工學碩士 學位論文

交流發電機 異常狀態時의 過渡現象에 關한 硏究

A Study on the Transient Phenomenon During Abnormal Condition of A. C. Generators

指導敎授 金 成 煥

2001年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機關工學科

吳 世 眞

목 차

그림 목차

*** 무부하 운전중 병렬투입**

*** 정격 운전중인 1대의 발전기에 병렬투입**

*** 정격 운전중인 2대 이상의 발전기에 병렬투입**

A Study on the Transient Phenomenon
During Abnormal Condition of A. C. Generators

Oh Sae-Gin

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

It is common knowledge amongst electrical and marine engineers that short-circuit in electrical system may cause large mechanical torque on generator and prime mover. However, It is not so widely known that faulty synchronizing of generators may cause even higher torques than that of short-circuit. In this study, the transient phenomenon related to the short-circuit and parallel running of synchronous generators are compared and analysed. Computer simulation results show importance of synchronizing when parallel running of synchronous generators. Maximum transient torque and current take place in case of 120° phase difference parallel running of generators and may develop higher torque than short-circuit according to a condition of synchronizing. When synchronizing in power system using only two generators higher torque and current are occurred to Master, but using multimachine system higner torque and

current are occurred to Slave. Short-circuit of marine generator is not frequently happened but faulty synchronizing takes place frequently, therefore, it is necessary to consider these phenomena for designing generators.

기호 설명

f : 주파수 [Hz]

P : 극수

N : 분당 회전수 [rpm]

v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : 고정자 전압 [V]

$kq11$, $kq21$, $kd1$, $kq12$, $kq22$, $kd2$: 제동권선

$fd1$, $fd2$: 계자권선

N_s : 고정자 권선수

L_{ls1}, L_{ls2} : 고정자 누설인덕턴스 [H]

$L_{kq11}, L_{kq21}, L_{kd1}, L_{kq12}, L_{kq22}, L_{kd2}$: 회전자 자기인덕턴스 [H]

L_{lfd1}, L_{lfd2} : 계자 누설인덕턴스 [H]

$L'_{kq11}, L'_{kq21}, L'_{kd1}, L'_{kq12}, L'_{kq22}, L'_{kd2}$: 고정자측으로 변환한 회전자 자기인덕턴스 [H]

L'_{lfd1}, L'_{lfd2} : 고정자측으로 변환한 계자 누설인덕턴스 [H]

$v_{kq11}, v_{kq21}, v_{kd}, v_{kq12}, v_{kq22}, v_{kd2},$: 제동권선 전압 [V]

v_{fd1}, v_{fd2} : 계자 전압 [V]

r_{as}, r_{bs}, r_{cs} : 고정자 저항 [Ω]

$r_{kq11}, r_{kq21}, r_{kd1}, r_{kq12}, r_{kq22}, r_{kd2}$: 제동권선 저항 [Ω]

r_{fd1}, r_{fd2} : 계자 저항 [Ω]

i_{as}, i_{bs}, i_{cs} : 고정자 전류 [A]

$i_{kq11}, i_{kq21}, i_{kd1}, i_{kq12}, i_{kq22}, i_{kd2}$: 제동권선 전류 [A]

i_{fd1}, i_{fd2} : 계자 전류 [A]

λ_{as}, λ_{bs}, λ_{cs} : 고정자 쇄교자속 [Wb]

$\lambda_{kq11}, \lambda_{kq21}, \lambda_{kd1}, \lambda_{kq12}, \lambda_{kq22}, \lambda_{kd2}$: 제동권선 쇄교자속 [Wb]

$\lambda_{fd1}, \lambda_{fd2}$: 계자 쇄교자속 [Wb]

v_{qs1}, v_{ds1}, v_{0s1}, v_{qs2}, v_{ds2}, v_{0s2} : 고정자 d- q 축 전압 [V]

i_{qs1}, i_{ds1}, i_{0s1}, i_{qs2}, i_{ds2}, i_{0s2} : 고정자 d- q 축 전류 [A]

$i'_{kq11}, i'_{kq21}, i'_{kd1}, i'_{kq12}, i'_{kq22}, i'_{kd2}$: 고정자측으로 변환한 제동권선 전류 [A]

i'_{fd1}, i'_{fd2} : 고정자측으로 변환한 계자 전류 [A]

λ'_{kq11}, λ'_{kq21}, $\lambda'_{kd1}, \lambda'_{kq12}$, λ'_{kq22}, λ'_{kd2} : 고정자측으로 변환한 제동권선 쇄교자속 [Wb]

λ'_{fd1}, λ'_{fd2} : 고정자측으로 변환한 계자 쇄교자속 [Wb]

r'_r : 고정자측으로 변환한 회전자 저항 [Ω]

v'^{r}_{qs1}, v'^{r}_{ds1}, v'^{r}_{0s1}, v'^{r}_{qs2}, v'^{r}_{ds2}, v'^{r}_{0s2} : 회전자 축 변수로 변환한 고정자 전압 [V]

i'^{r}_{qs1}, i'^{r}_{ds1}, i'^{r}_{0s1}, i'^{r}_{qs2}, i'^{r}_{ds2}, i'^{r}_{0s2} : 회전자 축 변수로 변환한 고정자 전류 [A]

e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} : 무한모선의 전압 [V]

v_{ql}, v_{dl}, v_{0l} : 부하의 d- q 축 전압 [V]

$i_{1,}$ i_2 : 교류발전기 출력전류 [A]

i_l : 부하 전류 [A]

i_{al}, i_{bl}, i_{cl} : 부하 전류 [A]

θ : 임의의 좌표축의 각변위 [rad]

θ_e : 동기회전 좌표축의 각변위 [rad]

θ_r : 회전자의 각변위 [rad]

θ_{df} : 교류발전기 병렬운전시 발전기 사이의 전압의 각변위 [rad]

ω : 임의의 좌표축의 각속도 [rad/s]

ω_r : 회전자 각속도 [rad/s]

J : 관성모멘트 [J·s^2]

T_e : 전기적 발생 토크 [T]

T_i : 기계적 입력 토크 [T]

pu : per unit

Master : 전력시스템에 전력을 공급하고 있는 발전기

Slave : 전력시스템으로 투입되는 발전기

제 1 장 서 론

대규모의 전력은 동기기라 불리는 3상 교류발전기에 의하여 생산된다. 발전기 고정자권선의 극수는 회전자의 자극수와 일치시켜 고정자에 배치되며 균일한 3상 전압을 발생한다. 자극이 설치되어 있는 회전자는 원동기에 의해 일정한 속도로 회전하며 계자권선에는 직류전류를 공급하여 여자시킨다. 회전자에는 한 개 혹은 그 이상의 단락권선을 가지고 있어 발전기 상태변화시 안정성을 증가시키는데 이를 제동권선이라 한다. 계자권선에 직류전류를 공급하는 방법에는 슬립링을 통하는 방법과 회전자와 동축에 연결된 회전전기자 발전기에 의한 방법이 있는데 최근에는 후자의 방법인 브러시리스 방법이 널리 사용된다.

발전기의 회전자에는 원통형과 돌극형이 있는데 원통형은 고속회전 발전기에 사용하며 돌극형은 저속회전 발전기에 사용된다. 원통형 회전자는 공극이 균일하며 고속회전시 원심력의 영향이 크므로 직경은 작고 축방향 길이가 긴 형태를 취한다. 반면 돌극형 회전자는 공극이 불균일하게 되며 저속회전시에는 원심력의 영향이 적으므로 직경은 크고 축방향 길이는 짧은 형태를 취한다.

발전기에는 전기적인 단락, 접지사고 및 병렬운전시의 동기화실패 등으로 기기에 손상이 발생될 수 있다. 전기적인 단락, 접지사고시는 높은 과도토크 및 과도전류를 발생하여 발전기에 여러 가지의 손상을 입힐 수 있으며 이러한 전기적인 사고시의 과도현상[1]은 잘 알려져 있다. 그러나 발전기 병렬운전시의 동기화실패로 인하여 발생하는 과도현상은 잘 알려져 있지 않고 이에 대한 연구도 찾아보기 힘들다.

보통 정상상태 운전의 경우 발전기에 발생하는 토크는 맥동하지 않는 단일 방향의 힘으로 작용한다. 그러나 발전기에 전기적인 단락 및 접지사고가 발생하면 크게 맥동하는 과도토크가 발생하여 기기에 큰 손상을 입히게 된다. 이와 비슷하게 발전기의 동기화실패로 인한 과도토크도 맥동하는 토크가 되

며 일반적으로 알려진 전기적인 단락 및 접지사고시와 유사한 손상을 발전기에 입힐 수 있다.

영국선급[2]에 보고된 동기화실패에 의한 발전기 손상의 유형은 고정자권선의 변형, 고정자철심과 프레임 사이의 거리변화, 브러시리스타입의 회전정류자의 손상, 축의 비틀림, 프레임 파손, 축단키의 손상과 축단면에서의 크랙확대, 커플링 파손, 기어의 손상 등이 있다. 그리고 최근 국적선사에서도 발전기 병렬운전시의 반복되는 동기화실패로 인하여 발전기축이 절손되었다고 주장하는 사례[3]가 보고되었다.

본 연구에서는 먼저, 교류발전기의 수학적 모델을 사용하여 접지사고시의 과도현상을 컴퓨터 모의실험을 통해 알아본다. 또한, 병렬운전시의 등가모델을 제안하고 병렬투입시의 다양한 과도현상을 면밀히 추적해 볼 수 있는 프로그램의 개발을 시도하며 이를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 그리고 위의 두 모의실험에 의해 전기적인 접지사고시와 병렬투입시의 과도상태를 서로 비교함으로써 병렬운전시의 정확한 동기투입의 중요성과 필요성을 고찰해 보고자한다.

제 2 장 교류발전기 개요

2.1 발전 원리

도체가 자속을 끊으면 그 도체에는 전자유도법칙에 의해서 기전력이 유기된다. 자극 N, S 사이에 코일을 놓고 축을 중심으로 일정한 속도로 회전시키면 코일에는 플레밍의 오른손법칙에 의해서 기전력이 발생되는데 기전력의 값은 영(零), 정(正)방향의 최대값 다시 영(零) 그리고 부(負)방향의 최대가 되는 값을 반복한다. 이와 같이 반복되는 하나의 행정을 사이클이라고 하며 1초간의 사이클 수를 주파수라 하여 f 로 표시하고 단위는 [Hz]를 쓴다. 2극 발전기는 1회전에 1 [Hz]가 발생되고, P 극 발전기에서는 1회전에 $\frac{P}{2}$ [Hz] 가 발생된다. 즉, 다음 식으로 표현된다.

$$\text{주파수 } (f) = \frac{\text{극수}(P)}{2} \times \frac{\text{동기속도}(N)}{60} \quad [\text{Hz}] \qquad (2.1.1)$$

위 식을 변형하면 $N = \frac{120f}{P}$ [rpm] 이 된다. 여기서 N 은 주파수 f 와 극수 P 에 의해 정해지는 동기속도(同期速度)이다. 이와 같이 동기속도로 회전하는 교류발전기를 동기발전기, 또는 간단히 동기기라고 한다.

2.2 교류발전기의 출력

발전소에서 많이 이용하는 원통형 발전기의 페이저도는 Fig. 2.1과 같다.

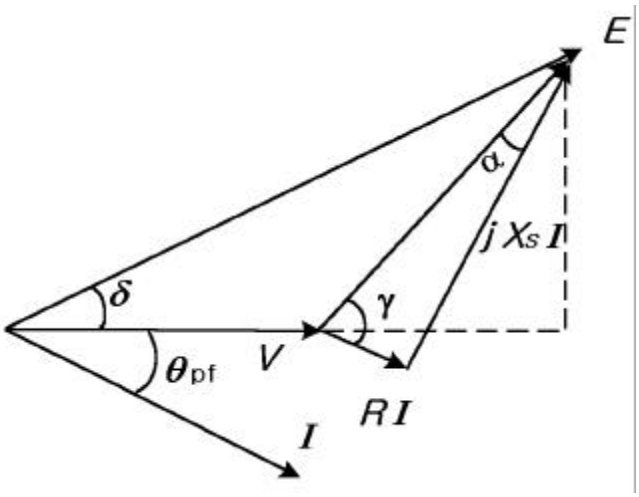


Fig. 2.1 Phasor Diagram of A.C. Generator

V를 단자전압, I를 전기자전류, E를 공칭유기기전력, $Z_s (= r + j X_s)$를 동기임피던스, θ_{pf}를 역률각, δ를 V와 E 사이의 각인 부하각(Power Angle)이라 하면 각 상의 출력은 아래 식이 된다.

$$P_o = \frac{E V}{Z_s} \sin(\delta + \alpha) - \frac{V^2}{Z_s} \sin\alpha \qquad (2.2.1)$$

여기에서 전기자저항은 극히 작으므로 이것을 무시하고 $Z_s = X_s$, $\alpha = 0$이라 하면 각 상의 출력 P_o는 $P_o = \frac{E V}{X_s} \sin\delta$가 되므로 출력은 $\delta = 90°$에서 최대가 된다.

2.3 전기자반작용

2.3.1 유기기전력과 전기자전류가 동상인 경우 (역률; 1)

전압과 동상인 전류가 최대로 흐르게 되는 상태는 자극이 도체의 한가운데를 지나는 순간이다. 전기자전류에 의한 기자력이 주계자에 의한 기자력과 공간적으로 전기각 90°의 각이 되는 방향, 즉 횡축방향으로 작용하고 있으므로 이것을 횡축반작용 또는 교차자화작용이라 한다.

2.3.2 전기자전류가 유기기전력보다 90° 뒤지는 경우

유기기전력이 최대인 위치에서 자극이 전기각으로 90° 이동해서 유기기전력이 0이 되는 순간에 전류는 최대가 되는데 전류가 유기기전력 보다 90° 뒤진 경우 전기자전류에 의한 기자력은 계자의 작용축과 직축방향으로 일치하여 작용하므로 직축반작용이라 하며 계자자속을 감소시키므로 감자(減磁)작용 이라고도 한다.

2.3.3 전기자전류가 유기기전력 보다 90° 앞서는 경우

전기자전류가 유기기전력 보다 90° 앞선 경우에는 자극이 감자작용시와 정반대이다. 이때에는 전기자전류에 의한 기자력이 계자자속을 증가시키므로 증자(增磁)작용이라 한다.

2.4 누설리액턴스

2.4.1 전기자 누설자속

전기자권선과는 쇄교하나 계자와는 쇄교하지 않는 자속 또는 쇄교하여도 전기자 유기기전력의 기본파에 영향을 주지 않는 자속을 전기자 누설자속(Leakage Flux)이라 한다.

2.4.2 전기자 누설리액턴스(Leakage Reactance)

누설자속에 의한 리액턴스를 일괄해서 전기자 누설리액턴스라 한다. 여기에는 슬롯(Slot) 누설리액턴스, 공극(Air Gap) 누설리액턴스, 권선단부(Coil End) 누설리액턴스가 있다.

2.5 동기리액턴스

전기자반작용 리액턴스와 전기자 누설리액턴스를 합쳐 동기리액턴스라고 하며 이것에 전기자 실효저항을 벡터적으로 합한 것을 동기임피던스라고 한다. 동기리액턴스에 비해 전기자 실효저항은 보통 무시될 수 있을 정도이다.

2.6 교류발전기의 분류

2.6.1 발생전압의 상수(相數)에 의한 분류

단상(Single Phase)발전기는 1쌍의 자극에 대해 1개의 코일군을 가진 발전

기이며 다상(Poly Phase)발전기는 전기자권선이 다상으로 되어있는 발전기로서 대부분이 3상이며 6상등이 특수한 용도로 쓰인다. 3상은 전기자권선이 전기각으로 120° 간격으로 배치되어 맥동이 적은 매끄러운 파형의 전력을 얻을 수 있고 경제적인 발전기를 만들 수 있다.

2.6.2 자극의 구조에 의한 분류

회전전기자형(Revolving Armature Type) 발전기는 자극이 고정되어 있고 전기자가 회전하는 구조로 되어 있는 것으로서 소용량 저전압발전기에 적용되며 회전계자형(Revolving Field Type) 발전기는 전기자를 고정하고 계자를 회전시키는 구조로서 대용량 고전압발전기에 사용된다. 회전계자형은 회전자의 형태에 따라 원통형과 돌극형으로 나누어진다.

2.7 교류발전기의 병렬운전

2.7.1 동기(同期)

발전기를 전력시스템으로 투입하고자 할 때 전력시스템과 발전기측의 제반 전기적인 특성을 일치시키는 것을 말한다.

2.7.2 병렬운전 방법

교류발전기를 안전하고 만족하게 병렬운전하기 위해서는 병렬운전시 발전기 상호간의 전압, 위상, 주파수, 파형을 일치시켜야 한다. 이상의 병렬운전 조건을 모두 만족시켜야 발전기 병렬운전시에 이상현상이 발생하지 않으며 만약 하나의 조건이라도 만족하지 못할 경우에는 발전기에 이상현상을 초래

한다.

전압이 같지 않을 경우에는 발전기 사이에 순환전류가 흐르게 되는데 발전기에서의 동기리액턴스는 전기자저항보다 훨씬 크므로 순환전류는 전압에 대해서 거의 90° 의 위상차를 갖는 무효순환전류가 된다.

위상이 같지 않을 경우에는 유효횡류가 발전기 사이에 흘러 상당한 전기적인 토크를 발생한다. 이 과도토크의 크기는 전압의 위상각차가 얼마인가에 따라서 다르다.

주파수가 같지 않을 경우에는 위상이 일치하지 않으므로 발전기 사이에 주기적인 동기화전류가 교대로 흐르게 된다. 이 경우 동기화전류의 교환이 빈번하게 되면 난조의 원인이 될 수 있고, 전력(부하)분담이 서로 다르게 된다. 즉 전력시스템에서 점차적으로 부하가 상승하게 되면 발전기 사이에서의 부하 분담률도 같아져야 하는데 부하가 한쪽의 발전기로 쏠리는 현상이 발생한다.

2.8 부하 분담

2.8.1 무효 전력

발전기가 병렬로 접속되어 전력을 공급하는 전력시스템에서 부하의 유효전력 분담은 각 발전기가 원동기로부터 받는 동력에 비례하게 되고 무효전력은 각 발전기에 주어지는 여자의 크기에 의해서 결정된다. 병렬운전 되고 있는 두 발전기의 전압과 위상이 같을 때 한 발전기의 여자전류를 증가시키면 두 발전기의 유기기전력에 차이가 나고 두 발전기 사이에는 무효순환전류가 흐르게 되는데 여자전류를 증가시킨 발전기에는 지상전류가 흘러 단자전압을 내리게 되고 다른 발전기에 대해서는 진상전류가 흘러 단자전압을 올리게 되어 두 발전기 사이의 단자전압은 평형을 이루게 된다. 이와 같이 무효순환전류가 흐르게 되면 여자전류를 증가시킨 발전기는 그만큼 무효순환전류가 증

가하고 다른 발전기는 그만큼 무효순환전류가 감소하게 되므로 결과적으로 무효전력의 분담이 변하게 된다. 즉 병렬운전중 한 발전기의 여자전류를 변화시키면 무효전력의 분담이 달라지므로 각 발전기의 역률이 상이하게 된다.

2.8.2 유효 전력

두 발전기가 병렬운전 되어 전력을 공급하고 있는 전력시스템에서 한 발전기 원동기의 조속기를 조정하여 발전기의 기계적 입력을 증가시키면 그 발전기의 유기전압의 위상은 다른 발전기에 비하여 앞서려고 하고 두 발전기 사이에는 동기화력이 발생하여 기계적 입력이 증가된 발전기의 부하분담은 증가하게 되고 다른 발전기의 부하분담은 감소하게 된다. 즉 병렬운전에서 발전기를 구동하는 원동기의 기계적 출력을 변화시키면 유효전력의 분담을 조정할 수 있게 된다.

제 3 장 교류발전기 과도현상 해석

3.1 기계변수에 의한 교류발전기의 수학적 모델

3상 교류발전기는 고정자에 3개의 권선이 120° 의 간격으로 배치되어 있고 회전자에는 계자권선이 있다. 또한 회전자에는 단락권선인 제동권선을 추가하여 발전기 상태변화시의 안정성을 확보할 수 있다. 제동권선이 고정자권선에 나란한 방향에 2개, 계자권선과 같은 방향에 1개가 있는 2극 3상 돌극형 교류발전기의 구성요소를 개략적으로 도시하면 아래 그림과 같다.

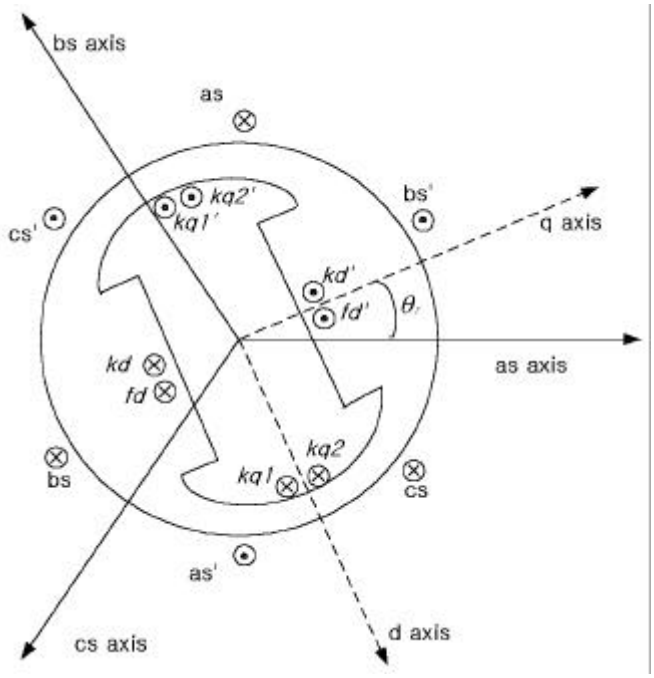


Fig. 3.1 Model of A.C. Generator

발전기에서 전류가 나오는 방향을 양으로 가정했을 때 발전기의 전압방정식은 다음과 같이 된다.

$$v_{abcs} = - r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs}$$
$$v_{qdr} = r_r i_{qdr} + p \lambda_{qdr} \qquad (3.1\text{-}1)$$

여기서

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}]$$
$$(f_{qdr})^T = [f_{kq1} \quad f_{kq2} \quad f_{fd} \quad f_{kd}]$$
$$r_s = diag[r_s \quad r_s \quad r_s]$$
$$r_r = diag[r_{kq1} \quad r_{kq2} \quad r_{fd} \quad r_{kd}]$$

위 식에서 f 는 전기적인 물리량을 나타내고 첨자 s 와 r 은 각각 고정자와 회전자에 관계된 변수들이다. Fig. 3.1에서 고정자와 회전자의 쇄교자속 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}2)$$

여기서

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}3)$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{skq1}\cos\theta_r & L_{skq2}\cos\theta_r & L_{sfd}\sin\theta_r & L_{skd}\sin\theta_r \\ L_{skq1}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq2}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd}\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd}\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{skq1}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq2}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd}\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd}\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.1\text{-}4)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lkq1} + L_{mkq1} & L_{kq1kq2} & 0 & 0 \\ L_{kq1kq2} & L_{lkq2} + L_{mkq2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd} + L_{mfd} & L_{fdkd} \\ 0 & 0 & L_{fdkd} & L_{lkd} + L_{mkd} \end{bmatrix} \quad (3.1\text{-}5)$$

또한, 위 식들에서 각 인덕턴스들은 아래와 같다.

$$L_A = \frac{1}{3}(L_{mq} + L_{md}), \qquad L_B = \frac{1}{3}(L_{md} - L_{mq})$$

$$L_{skq1} = (\frac{N_{kq1}}{N_s})(\frac{2}{3})L_{mq}, \qquad L_{skq2} = (\frac{N_{kq2}}{N_s})(\frac{2}{3})L_{mq}$$

$$L_{sfd} = (\frac{N_{fd}}{N_s})(\frac{2}{3})L_{md}, \qquad L_{skd} = (\frac{N_{kd}}{N_s})(\frac{2}{3})L_{md}$$

$$L_{mkq1} = (\frac{N_{kq1}}{N_s})^2(\frac{2}{3})L_{mq}, \quad L_{mkq2} = (\frac{N_{kq2}}{N_s})^2(\frac{2}{3})L_{mq} \qquad (3.1\text{-}6)$$

$$L_{mfd} = (\frac{N_{fd}}{N_s})^2(\frac{2}{3})L_{md}, \qquad L_{mkd} = (\frac{N_{kd}}{N_s})^2(\frac{2}{3})L_{md}$$

$$L_{kq1kq2} = (\frac{N_{kq2}}{N_{kq1}}), \qquad L_{mkq1} = (\frac{N_{kq1}}{N_{kq2}})L_{mkq2}$$

$$L_{fdkd} = (\frac{N_{kd}}{N_{fd}}), \qquad L_{mfd} = (\frac{N_{fd}}{N_{kd}})L_{mkd}$$

단, L_{md} 는 직축인덕턴스, L_{mq} 는 횡축인덕턴스이다.

회전자의 변수 및 파라미터를 고정자권선의 값으로 변화시키는 것이 편리하므로 다음 식에 의해서 고정자권선의 값으로 변환한다.

$$i_j' = (\frac{2}{3})(\frac{N_j}{N_s})i_j \quad , \quad v_j' = (\frac{N_s}{N_j})v_j \quad , \quad \lambda_j' = (\frac{N_s}{N_j})\lambda_j$$

$$r_j' = (\frac{3}{2})(\frac{N_s}{N_j})^2 r_j \quad , \quad L_{lj}' = (\frac{3}{2})(\frac{N_s}{N_j})^2 L_{lj} \qquad (3.1\text{-}7)$$

여기서 j 는 회전자의 변수를 의미한다. 회전자의 변수를 고정자의 변수로 변화시키면 다음과 같은 쇄교자속 방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr}' \\ 2/3(L_{sr}')^T & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i_{qdr}' \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}8)$$

여기서

$$L_{sr}' = \begin{bmatrix} L_{mq}\cos\theta_r & L_{mq}\cos\theta_r & L_{md}\sin\theta_r & L_{md}\sin\theta_r \\ L_{mq}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{mq}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md}\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md}\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{mq}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{mq}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md}\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md}\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}9)$$

$$L_r' = \begin{bmatrix} L_{lkq1}' + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L_{lkq2}' + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd}' + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{lkd}' + L_{md} \end{bmatrix} \qquad (3.1\text{-}10)$$

따라서, 아래 식과 같이 기계변수에 의한 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ (2/3)p(L'_{sr}) & r'_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i'_{qdr} \end{bmatrix} \tag{3.1-11}$$

또한, 발생되는 토크를 표시하면 식(3.1-12)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} T_e = \left(\frac{P}{2}\right)\Bigg\{ & \frac{(L_{md} - L_{mq})}{3}\Big[(i_{as}^2 - \frac{1}{2}i_{bs}^2 - \frac{1}{2}i_{cs}^2 - i_{as}i_{bs} + 2i_{bs}i_{cs})\sin 2\theta_r \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{bs}^2 + i_{cs}^2 - 2i_{as}i_{bs} + 2i_{as}i_{cs})\cos 2\theta_r\Big] \\ & - L_{mq}(i'_{kq1} + i'_{kq2})\Big[(i_{as} - \frac{1}{2}i_{bs} - \frac{1}{2}i_{cs})\sin\theta_r - \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{bs} - i_{cs})\cos\theta_r\Big] \\ & - L_{md}(i'_{fd} + i'_{kd})\Big[(i_{as} - \frac{1}{2}i_{bs} - \frac{1}{2}i_{cs})\cos\theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{bs} - i_{cs})\sin\theta_r\Big]\Bigg\} \end{aligned} \tag{3.1-12}$$

3.2 $d-q$ 등가모델

3.2.1 $d-q$ 등가모델의 원리

교류발전기의 동특성은 고정자와 회전자 사이의 결합효과 때문에 매우 복잡하며 회전자의 위치에 따라 결합계수가 변화하므로 교류발전기 모델은 시변계수를 갖는 연립 미분방정식으로 표현된다. 또한, 제반 방정식이 비선형이므로 간단한 몇 개의 시정수로 쉽게 분리될 수 없다. 그러므로, 정확하고 간단하며 실제적인 수학적 모델이 필요하게 되며 이는 과도 및 정상상태 모두를 고려해야 한다.

발전기의 동특성 모델을 얻기 위해서는 2축이론으로 불리는 $d-q$ 변환이

론이 주로 사용된다. 이 $d-q$변환이론을 사용하면 시변 파라미터가 제거되고 고정자의 제반변수와 파라미터가 $d-q$직교좌표축상의 값으로 표현된다.

또한, 이 $d-q$축 동특성 모델은 고정자에 고정된 고정좌표계나 회전자계와 동기로 회전하는 동기회전좌표계상의 값으로 표현될 수 있다. R. H. Park[4]이 제안한 고정좌표계는 기본적으로 축 변환과정을 나타내며 고정자와 회전자의 전압, 전류 및 쇄교자속에 대해 선형변환을 적용하였다. 고정좌표계의 a, b, c축과 $\alpha-\beta$축 사이의 관계를 설명하기 위해 고정자전압을 예로 들어 Fig. 3.2에 나타내었다.

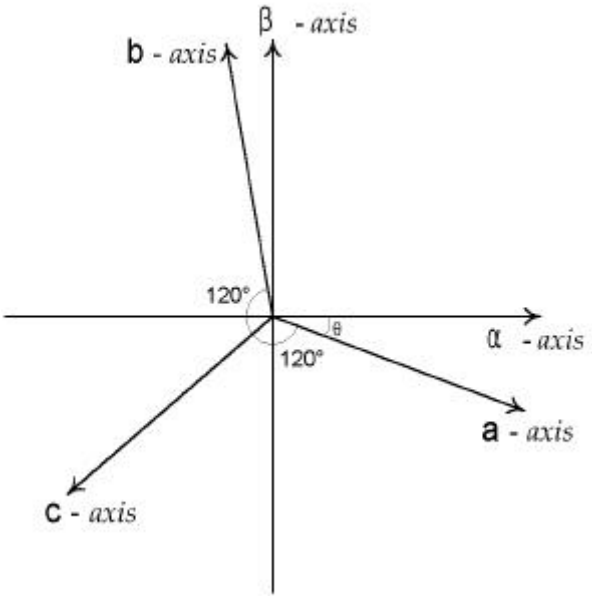


Fig. 3.2 Transformation of stationary a,b,c axis to $\alpha-\beta$ axis

위 그림에서 알 수 있듯이 임의의 시간의 상전압 v_{as}는 α축성분 $v_{\alpha s}\cos\theta$와 β축성분 $-v_{\beta s}\sin\theta$의 합으로 이루어지며 b, c상전압은 a상과의 관계를 고려하면 식(3.2-1)과 같은 변환식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{os} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}1)$$

위 식에서 v_{os}는 영상분 전압을 나타내며 3상평형시 영이 된다.
또한, 식(3.2-1)을 역변환하면 식(3.2-2)가 되며 $\theta = 0$으로 하여 α축과 a축을 일치시키고 영상분을 무시하면 식(3.2-3)이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ v_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}3)$$

마찬가지로, 전류와 자속에 대해서도 같은 방법으로 변환할 수 있다. 이와 같이 3상 변수를 고정자에 고정된 2축 성분으로 변환한 값은 회전자계와 동기로 회전하는 동기회전좌표계상의 값과 Fig. 3.3과 같은 관계가 있으므로 식(3.2-4)에 의해 회전축상의 값으로 변환될 수 있다.

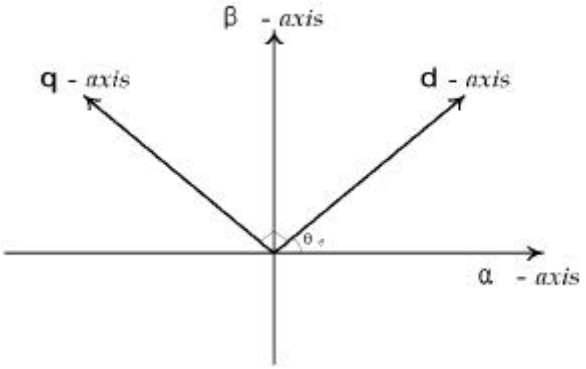


Fig. 3.3 Transformation of stationary α- β axis to synchronously rotating d- q axis

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} \tag{3.2-4}$$

또한, 위 식을 역변환하면 식(3.2-5)가 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \tag{3.2-5}$$

동기회전좌표계 모델은 정현 입력시 정상상태에서 변수들이 직류량으로 나타나기 때문에 교류기 해석에 많이 적용되고 있으며 앞의 식들에 의해 동기회전좌표계상의 2축변수들을 구할 수 있다.

3.2.2 임의의 회전좌표축에 대한 전압 및 토크 방정식

교류발전기의 전압방정식은 임의의 회전좌표축으로 변환하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{qd0s} = -r_s i_{qd0s} + \omega\lambda_{dqs} + p\lambda_{qd0s}$$

$$v'^{r}_{qdr} = r'_r i'^{r}_{qdr} + p\lambda'^{r}_{qdr} \qquad (3.2\text{-}6)$$

여기서

$$(\lambda_{dqs})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \qquad (3.2\text{-}7)$$

인덕턴스가 일정하고 $\theta - \theta_r = \theta_{df}$ **라 가정하면 식** (3.1-8)**은 고정자 변수들을 임의의 축 변수들로 변환하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.**

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'^{r}_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} \\ (2/3)(L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s} \\ i'^{r}_{qdr} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}8)$$

여기서

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A - L_B \cos 2\theta_{df}) & -\frac{3}{2} L_B \sin 2\theta_{df} & 0 \\ -\frac{3}{2} L_B \sin 2\theta_{df} & L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B \cos 2\theta_{df}) & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}$$

(3.2-9)

$$K_s L'_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq}\cos\theta_{df} & L_{mq}\cos\theta_{df} & -L_{md}\sin\theta_{df} & -L_{md}\sin\theta_{df} \\ L_{mq}\sin\theta_{df} & L_{mq}\sin\theta_{df} & L_{md}\cos\theta_{df} & L_{md}\cos\theta_{df} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}10)$$

$$\frac{2}{3}(L'_{sr})^T(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq}\cos\theta_{df} & L_{mq}\sin\theta_{df} & 0 \\ L_{mq}\cos\theta_{df} & L_{mq}\sin\theta_{df} & 0 \\ -L_{md}\sin\theta_{df} & L_{md}\cos\theta_{df} & 0 \\ -L_{md}\sin\theta_{df} & L_{md}\cos\theta_{df} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2\text{-}11)$$

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lkq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lkq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lfd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{lkd} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (3.2\text{-}12)$$

위의 방정식에서 L'_r행렬을 제외한 나머지 행렬의 항들은 θ_{df}를 포함하기 때문에 미분방정식의 해를 구할 때 좌표축 회전속도의 영향을 받는다. 그러나 만약 임의의 축과 회전자 축의 속도를 일치시키면 계수행렬이 상수가 되어 식이 간단해지며 발전기의 과도상태를 해석하는데 아주 편리하게 된다. 그리고 위의 식들에서 발생하는 토크를 표현하면 다음 식과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (3.2\text{-}13)$$

3.2.3 회전자 좌표축에 대한 전압 및 토크방정식

발전기의 해석에서 R. H. Park이 제안한 방정식을 사용하여 고정자 변수를 회전자 축으로 변환하여 시간에 따라 변화하는 인덕턴스를 상수화 하였다. 발전기 전압방정식을 Park's equation[4]을 사용하여 표현하면 다음과 같다. 즉, 앞 절의 전압방정식에서 $\theta_{df} = 0$인 경우이다.

$$v^{r}_{qd0s} = - r_s i^{r}_{qd0s} + \omega_r \lambda^{r}_{dqs} + p\lambda^{r}_{qd0s}$$

$$v^{'r}_{qdr} = i^{'}_{r} i^{'r}_{qdr} + p\lambda^{'r}_{qdr} \qquad (3.2\text{-}14)$$

또한, 쇄교자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda^{r}_{qd0s} \\ \lambda^{'r}_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K^{r}_{s} L_s (K^{r}_{s})^{-1} & K^{r}_{s} L^{'}_{sr} \\ 2/3 (L^{'}_{sr})^{T} (K^{r}_{s})^{-1} & L^{'}_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} - i^{r}_{qd0s} \\ i^{'r}_{qdr} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}15)$$

여기서

$$K^{r}_{s} L_s (K^{r}_{s})^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}16)$$

$$K^{r}_{s} L^{'}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}17)$$

$$\frac{2}{3} (L^{'}_{sr})^{T} (K^{r}_{s})^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \qquad (3.2\text{-}18)$$

$$L_r' = \begin{bmatrix} L'_{lkq1} + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L'_{lkq2} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lfd} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L'_{lkd} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (3.2\text{-}19)$$

위의 식들에서 발생토크는 식(3.2-20)**이 되고 발생토크에 의한 속도변화는 식**(3.2-21)**이 된다**.

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}(\lambda^r_{ds} i^r_{qs} - \lambda^r_{qs} i^r_{ds}) \quad (3.2\text{-}20)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}\frac{P}{2}(T_i - T_e) \quad (3.2\text{-}21)$$

3.2.4 부하의 회전자 좌표축에 대한 전압방정식

전력시스템의 부하는 저항성분과 인덕턴스성분의 합으로 등가화할 수 있으며 이 경우의 전압방정식은 아래 식과 같다.

$$v_{abcl} = \mathrm{r_L}\, i_{abcl} + p\,\lambda_{abcl} \quad (3.2\text{-}22)$$

여기서

$$\mathrm{r_L} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \qquad \lambda_{abcl} = \begin{bmatrix} L_l & 0 & 0 \\ 0 & L_l & 0 \\ 0 & 0 & L_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{al} \\ i_{bl} \\ i_{cl} \end{bmatrix}$$

식(3.2-22)를 Park's equation을 사용하여 회전자축에 대한 값으로 변환하면 식(3.2-23)을 얻을 수 있다.

$$
\begin{aligned}
v^r_{ql} &= r_l i^r_{ql} + \omega_r L_l i^r_{dl} + L_l \frac{d i^r_{ql}}{dt} \\
v^r_{dl} &= r_l i^r_{dl} - \omega_r L_l i^r_{ql} + L_l \frac{d i^r_{dl}}{dt} \\
v^r_{0l} &= r_l i^r_{0l} + L_l \frac{d i^r_{0l}}{dt}
\end{aligned}
\qquad (3.2\text{-}23)
$$

3.3 교류발전기 병렬운전시의 수학적 모델

A.C.B.가 투입되어 전력시스템의 부하에 전력을 공급하고 있는 발전기를 마스터(Master), 새로이 병렬운전하고자 하는 발전기를 슬레이브(Slave)라고 정의한다. 운전중인 두 대의 발전기 회전자축 각변위의 오차가 θ_{df} 라고 가정하면 Fig. 3.4와 같은 마스터, 슬레이브의 모델을 얻을 수 있다. 즉, θ_{df}는 두 발전기 유기전압의 위상각차이와 마스터 부하각의 합이 된다.

마스터 회전자의 위치를 기준으로 하여 두 발전기의 전압방정식을 세우면, 마스터의 경우 앞 절에서 Park's equation을 이용하여 세운 전압방정식인 식(3.2-14)와 같이 되고, 슬레이브는 마스터와 θ_{df} 의 각변위 차이가 있으므로 임의의 회전좌표축에 대한 방정식인 식(3.2-6)에서 $\theta = \theta_{r1}$, $\theta_r = \theta_{r2}$ 인 경우가 된다. 또한, 마스터의 회전자축에 대한 부하단의 전압방정식은 식(3.2-23)과 같이 표현할 수 있다.

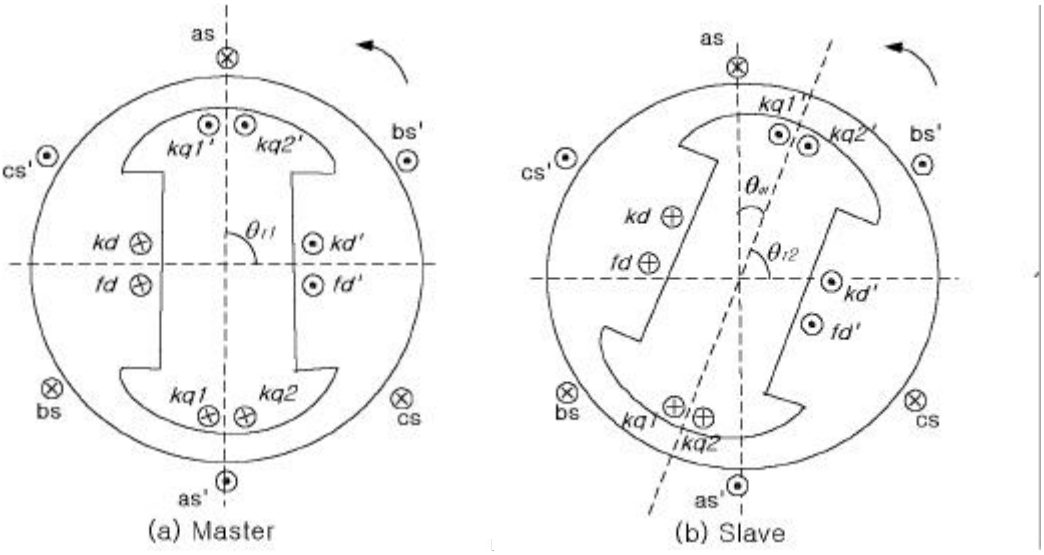


Fig. 3.4 Model of Master & Slave A.C. Generators

그리고 발전기 두 대를 사용하여 전력을 공급하는 시스템을 가정하면 전력시스템은 다음 그림과 같이 표현될 수 있다.

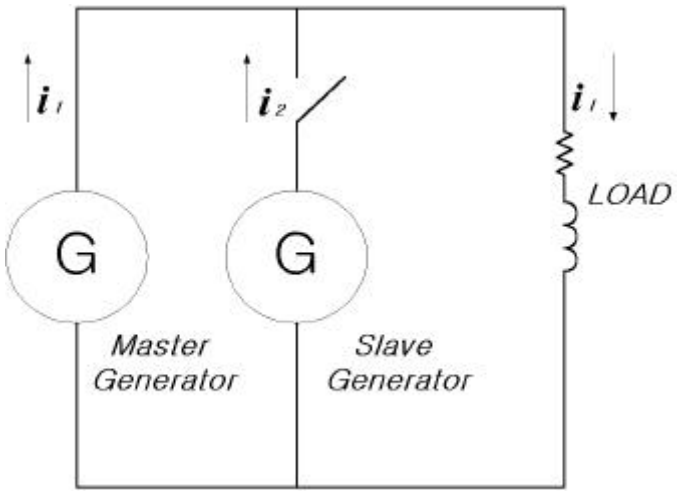


Fig. 3.5 Model of Power System

그림에서는 마스터가 단독으로 시스템에 전력을 공급하고 있으며 부하단의 전압은 마스터의 전압과 같다. 이때 시스템의 전력부족으로 슬레이브를 전력시스템에 투입하는 경우를 가정하면 병렬투입 후의 마스터, 슬레이브 및 부하단 사이의 전압은 동일하므로 서로간의 전압차이는 0이 된다. 그리고 부하전류 i_l은 두 발전기 출력전류의 합과 같다. 즉,

$$i_l = i_1 + i_2 \qquad (3.3\text{-}1)$$

또한, 식(3.3-1)의 미분식인 식(3.3-2)도 성립한다.

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \qquad (3.3\text{-}2)$$

이상의 조건을 종합하여 발전기 병렬운전시의 전압방정식을 세우면 식(3.3-3)과 같이 된다.

$$V = R\,i + \omega_r L\,i + Z\frac{di}{dt} \qquad (3.3\text{-}3)$$

여기서

$$\begin{aligned} V^T = & [\, v^r_{qs1} - v_{qs2} \quad v^r_{ds1} - v_{ds2} \quad v^r_{0s1} - v_{0s2} \quad v^r_{qs1} - v_{qsl} \\ & v^r_{ds1} - v_{dsl} \quad v^r_{0s1} - v_{0sl} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad v_{kq11} \quad v_{kq21} \quad v_{fd} \\ & v_{kd} \quad v_{kq12} \quad v_{kq22} \quad v_{fd2} \quad v_{kd2} \,] \\ = & [\, 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad v_{fd1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad v_{fd2} \quad 0 \,] \end{aligned} \qquad (3.3\text{-}4)$$

$$i^T = [\, i_{qs1} \;\; i_{ds1} \;\; i_{0s1} \;\; i_{kq11} \;\; i_{kq21} \;\; i_{fd1} \;\; i_{kd1} \;\; i_{qs2} \;\; i_{ds2} \;\; i_{0s2}$$
$$i_{kq12} \;\; i_{kq22} \;\; i_{fd2} \;\; i_{kd2} \;\; i_{ql} \;\; i_{dl} \;\; i_{0l} \,] \qquad (3.3\text{-}5)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & . & . & . & R_{1,17} \\ R_{2,1} & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ R_{1,71} & . & . & . & . & R_{17,17} \end{bmatrix} \qquad (3.3\text{-}6)$$

$R_{1,1} = -\, r_{s1}$, $R_{1,8} = r_{s2}$, $R_{2,1} = -\, r_{s1}$, $R_{2,9} = r_{s2}$

$R_{3,3} = -\, r_{s1}$, $R_{3,10} = r_{s2}$ $R_{4,1} = -\, r_{s1}$, $R_{4,15} = -\, r_l$

$R_{5,2} = -\, r_{s1}$, $R_{5,16} = r_{s2}$, $R_{6,3} = -\, r_{s1}$, $R_{6,17} = r_{s2}$

$R_{10,4} = r_{q11}$, $R_{11,5} = r_{q21}$, $R_{12,6} = r_{f1}$, $R_{13,7} = r_{kd1}$

$R_{11,11} = r_{q12}$, $R_{12,12} = r_{q22}$, $R_{13,13} = r_{f2}$, $R_{14,14} = r_{kd2}$

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & L_{1,2} & . & . & . & L_{1,17} \\ L_{2,1} & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ L_{1,71} & . & . & . & . & L_{17,17} \end{bmatrix} \qquad (3.3\text{-}7)$$

$$L_{1,2} = -L_{ls1} - L_{md1},\quad L_{1,6} = L_{md1},\quad L_{1,7} = L_{md1}$$

$$L_{1,8} = -\frac{3}{2}L_{B2}\sin 2\theta_{df},\quad L_{1,9} = L_{ls2} + \frac{3}{2}(L_{A2} + L_{B2}\cos 2\theta_{df})$$

$$L_{1,11} = -L_{mq2}\sin\theta_{df},\quad L_{1,12} = L_{mq2}\sin\theta_{df},\quad L_{1,13} = -L_{md2}\cos\theta_{df}$$

$$L_{1,14} = -L_{md2}\cos\theta_{df},\quad L_{2,1} = L_{ls1} + L_{mq1},\quad L_{2,4} = -L_{mq1}$$

$$L_{2,5} = -L_{mq1},\quad L_{2,8} = -L_{ls2} - \frac{3}{2}(L_{A2} + L_{B2}\cos 2\theta_{df})$$

$$L_{2,9} = \frac{3}{2}L_{B2}\sin 2\theta_{df},\quad L_{2,11} = L_{mq2}\cos\theta_{df},\quad L_{2,12} = L_{mq2}\cos\theta_{df}$$

$$L_{2,13} = -L_{md2}\sin\theta_{df},\quad L_{2,14} = -L_{md2}\sin\theta_{df}$$

$$L_{4,2} = -L_{ls1} - L_{md1},\quad L_{4,6} = L_{md1},\quad L_{4,7} = L_{md1},\quad L_{4,13} = -L_{l}$$

$$L_{5,1} = L_{ls1} + L_{mq1},\quad L_{5,4} = -L_{mq1},\quad L_{5,5} = -L_{mq1},\quad L_{5,12} = L_{l}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{1,17} \\ Z_{2,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{1,71} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{17,17} \end{bmatrix} \qquad (3.3\text{-}8)$$

$$Z_{1,1} = -L_{ls1} - L_{mq1},\quad Z_{1,4} = L_{mq1},\quad Z_{1,5} = L_{mq1}$$

$$Z_{1,8} = L_{ls2} + \frac{3}{2}(L_{A2} + L_{B2}\cos 2\theta_{df}),\quad Z_{1,9} = -\frac{3}{2}L_{B2}\sin 2\theta_{df}$$

$$Z_{1,11} = -L_{mq2}\cos\theta_{df},\quad Z_{1,12} = -L_{mq2}\cos\theta_{df},\quad Z_{1,13} = L_{md2}\sin\theta_{df}$$

$$Z_{1,14} = L_{md2}\sin\theta_{df},\quad Z_{2,14} = -L_{md2}\cos\theta_{df}$$

$$Z_{2,2} = -L_{ls1} - L_{md1},\quad Z_{2,6} = L_{md1},\quad Z_{2,7} = L_{md1}$$

$$Z_{2,8} = -\frac{3}{2}L_{B2}\sin 2\theta_{df},\quad Z_{2,9} = L_{ls2} + \frac{3}{2}(L_{A2} + L_{B2}\cos 2\theta_{df})$$

$$Z_{2,11} = -L_{mq2}\sin\theta_{df},\quad Z_{2,12} = -L_{mq2}\sin\theta_{df},\quad Z_{2,13} = -L_{md2}\cos\theta_{df}$$

$$Z_{3,3} = -L_{ls1},\quad Z_{3,10} = L_{ls2},\quad Z_{4,1} = L_{ls1} + L_{mq1},\quad Z_{4,4} = L_{mq1}$$

$$Z_{4,5} = -L_{mq1},\quad Z_{4,15} = -L_{l},\quad Z_{5,2} = -L_{ls1} - L_{md1},\quad Z_{5,6} = L_{md1}$$

$$Z_{5,7} = -L_{md1},\quad Z_{5,16} = -L_{l},\quad Z_{6,3} = L_{ls1},\quad Z_{6,17} = -L_{l}$$

$$Z_{7,1} = 1,\quad Z_{7,8} = 1,\quad Z_{7,15} = -1,\quad Z_{8,2} = 1,\quad Z_{8,9} = 1,\quad Z_{8,16} = -1$$

$$Z_{9,3} = 1,\quad Z_{9,10} = 1,\quad Z_{9,16} = -1$$

$$Z_{10,1} = -L_{mq1},\quad Z_{10,4} = L_{lkq11} + L_{mq1},\quad Z_{10,5} = L_{mq1}$$

$$Z_{11,1} = -L_{mq1},\quad Z_{11,4} = L_{lmq1},\quad Z_{11,5} = L_{lkq21} + L_{mq1}$$

$$Z_{12,2} = -L_{md1},\quad Z_{12,6} = L_{lfd1} + L_{md1},\quad Z_{12,7} = L_{md1}$$

$$Z_{13,2} = -L_{md1},\quad Z_{13,6} = L_{lmd1},\quad Z_{13,7} = L_{lkd1} + L_{md1}$$

$$Z_{14,8} = -L_{mq2}\cos\theta_{df},\quad Z_{14,9} = -L_{md2}\sin\theta_{df}$$

$$Z_{14,11} = L_{lkq12} + L_{mq2},\quad Z_{14,12} = L_{mq2},\quad Z_{15,8} = -L_{mq2}\cos\theta_{df}$$

$$Z_{15,9} = -L_{md2}\sin\theta_{df},\quad Z_{15,11} = L_{mq2},\quad Z_{15,12} = L_{lkq22} + L_{mq2}$$

$$Z_{16,8} = L_{md2}\sin\theta_{df},\qquad Z_{16,9} = -L_{md2}\cos\theta_{df}$$

$$Z_{16,13} = L_{lfd2} + L_{md2},\quad Z_{16,14} = L_{md2}$$

$$Z_{17,8} = L_{md2}\sin\theta_{df},\quad Z_{17,9} = -L_{md2}\cos\theta_{df}$$

$$Z_{17,13} = L_{md2},\quad Z_{17,14} = L_{lkd2} + L_{md2}$$

위의 미분방정식 계수행렬 R, L 및 Z 의 각 원소중 명시하지 않은 모든 원소들의 값은 0이다.

제 4 장 과도현상 모의실험 및 검토

교류발전기의 과도상태를 해석하기 위해서 육상발전소용 대형 증기터빈발전기와 선박에서 사용하는 소형 디젤발전기를 서로 비교하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 모의실험에 사용한 증기터빈발전기의 용량은 835 [MVA]이며 선박용 소형 디젤발전기의 용량은 600 [KVA]인 한국해양대학교 실습선 한나라호 발전기를 사용하였다. 증기터빈발전기의 파라미터는 서적[1]을 참고하였고 실습선 한나라호 발전기의 파라미터는 제작업체인 (주)현대중전기로부터 입수하였다. 모의실험에 사용한 발전기의 각 파라미터는 Table 1과 같다.

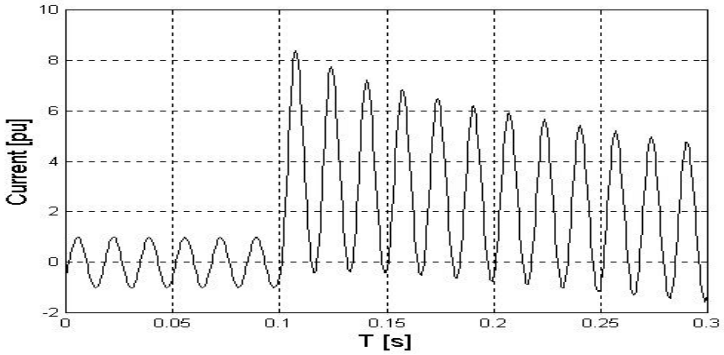
4.1 3상 접지(Three-Phase Earth)

일정 여자전압으로 정격부하 운전중이던 발전기에서 3상 접지사고가 일어났다고 가정하자. 3상 접지사고 이전에는 정격부하 운전상태였으므로 고정자 전류의 초기값은 3상 모두 정격전류가 되고 접지시의 전압은 3상 모두 0이 된다. 즉, $v_a = v_b = v_c = 0$ 이며 $v^r_{qs} = v^r_{ds} = v^r_{0s} = 0$ 이다. 이상의 초기조건으로 식(3.2-14)를 이용하여 정격부하로 운전중이던 발전기에 3상 접지가 발생했을시의 상태를 모의실험하였다. Fig. 4.1은 대형발전기 3상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타낸다. 상전류는 8.4(pu), 토크는 4.8(pu)까지 상승하였으며 여자전류는 정상상태에 비하여 3배 정도의 최고치를 보였다. Fig. 4.2는 소형발전기 3상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타내며 상전류는 7.5(pu), 토크는 4.7(pu), 여자전류는 7.2(pu) 정도의 최고치를 보인다.

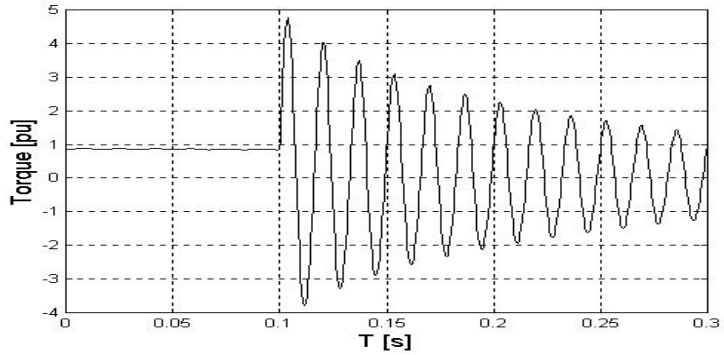
Table 1 Parameters of generators used for computer simulation

구 분	대형 증기터빈 발전기(발전소용)	소형 디젤발전기 (선박용, 한나라호)
정격 용량	835 [MVA]	600 [KVA]
선간 전압	26 [KV]	450 [V]
역 률	0.85	0.8
극수 (P)	2	10
속도 [$r/\min$]	3600	720
고정자권선 저항 [Ω]	0.00243	0.00576
고정자권선 누설 리액턴스 (X_{ls}), [Ω]	0.1538	0.03087
횡축 리액턴스 (X_q), [Ω]	1.457	0.7252
직축 리액턴스 (X_d), [Ω]	1.457	0.8658
※횡축 1차 제동권선 저항 [Ω]	0.00144	0.04181
※횡축 2차 제동권선 저항 [Ω]	0.00681	-
※ 횡축 1차 제동권선 누설 리액턴스 (X'_{lkq1}), [Ω]	0.6578	0.05673
※ 횡축 2차 제동권선 누설 리액턴스 (X'_{lkq2}), [Ω]	0.07602	-
※ 계자 권선 저항 [Ω]	0.00075	0.002621
※ 계자 권선누설 리액턴스 (X'_{lfd}), [Ω]	0.1145	0.05906
※ 직축 제동권선 저항 [Ω]	0.0108	-
※ 직축 제동권선 누설 리액턴스 (X'_{lkd}), [Ω]	0.06577	-
관성 모멘트 (J), [$Kg\,m^2$]	65800	371

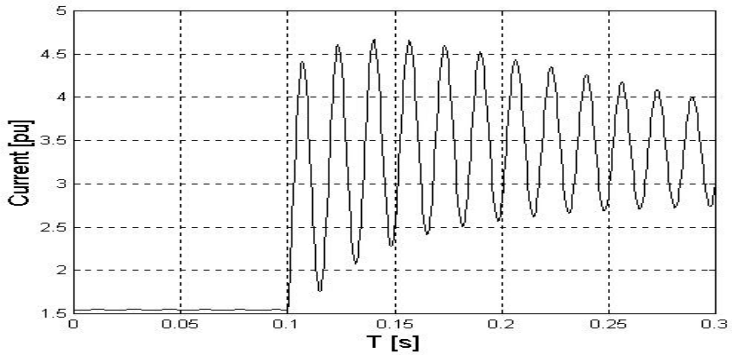
※표는 고정자측으로 변환한 값



(a) Phase Current

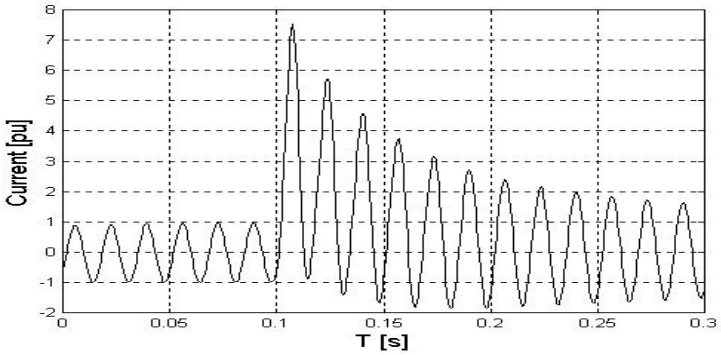


(b) Torque

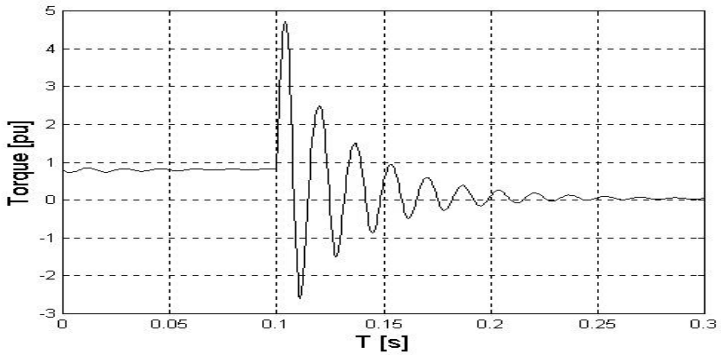


(c) Field Current

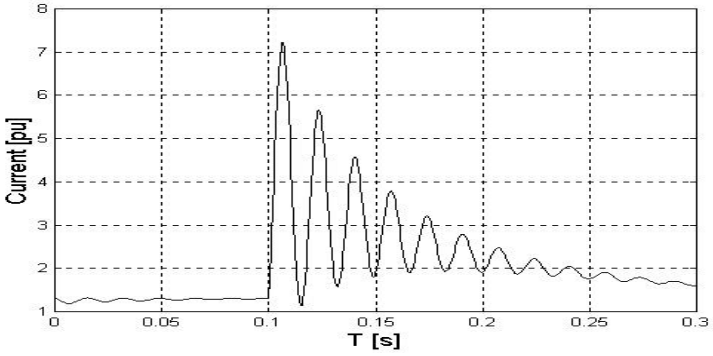
Fig. 4.1 Three-Phase Earth of Power Station A.C. Generator



(a) Phase Current



(b) Torque



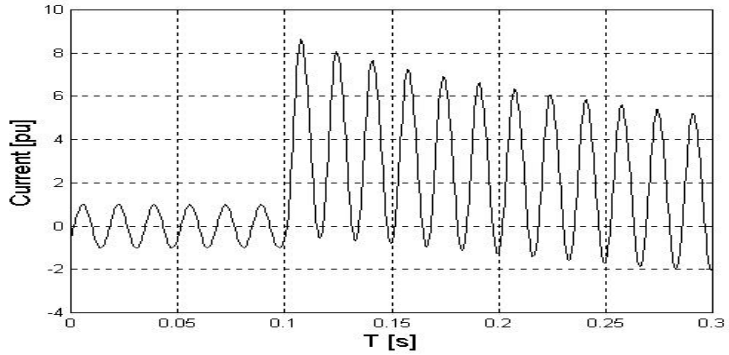
(c) Field Current

Fig. 4.2 Three-Phase Earth of Marine A.C. Generator

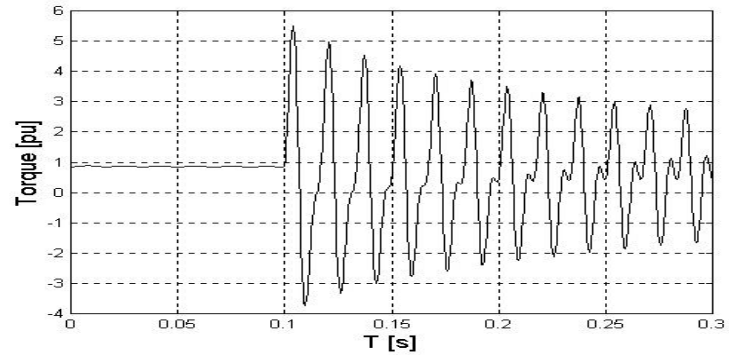
4.2 2상 접지 (Two-Phase Earth)

무한모선에 연결되어 정격전력을 공급하던 중 두 상이 접지되는 상태가 발생되었다고 가정하자. 접지되지 않은 한 상의 권선에는 정격전압이 가해지지만 접지된 권선들의 전압은 0이 된다. 정격부하 상태였으므로 초기전류는 정격전류가 흐르게 되고 접지된 권선이 a, b상이라면 전압의 조건은 $v_a = 0$, $v_b = 0$, $v_c = e_{gc}$ 가 된다. 이 초기조건으로 발전기 2상 접지사고시의 상태를 모의실험하였다. Fig. 4.3은 대형발전기 2상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타낸다. 상전류는 8.4(pu), 토크는 5.5(pu)까지 상승하였으며 여자전류는 정상상태에 비하여 2.8배 정도의 최고치를 보였다. Fig. 4.4는 소형발전기 2상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타내며 상전류는 9.6(pu), 토크는 5.4(pu), 여자전류는 7(pu)의 최고치를 보인다.

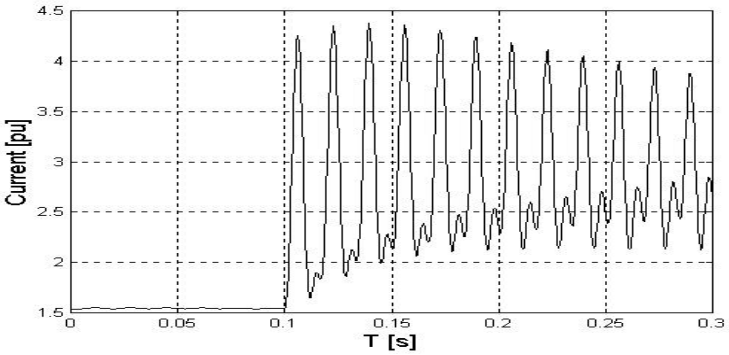
대형발전기 2상 접지시의 상태를 3상 접지시와 비교하여 볼 때 발생하는 전류는 비슷하지만 발생되는 토크는 더 크며 소형발전기는 3상 접지시보다 전류와 토크 모두 크게 발생된다.



(a) Phase Current

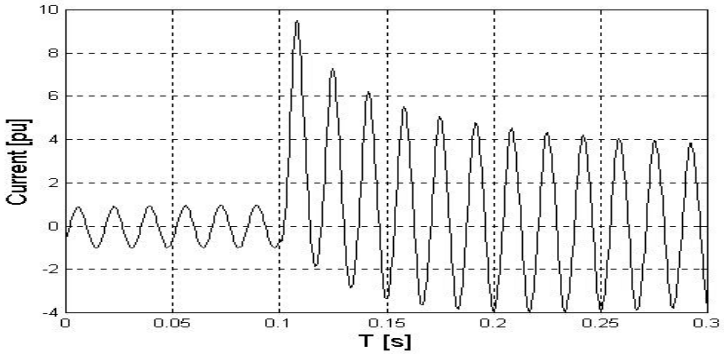


(b) Torque

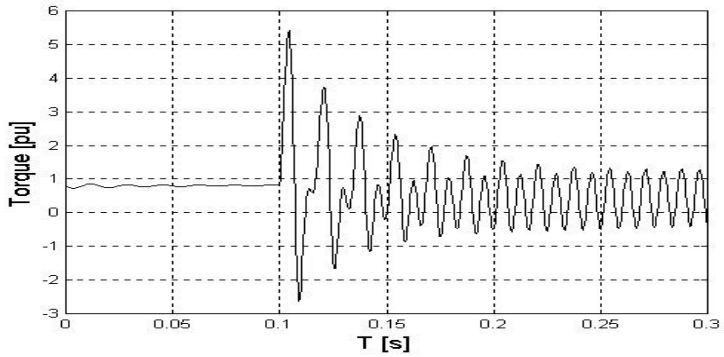


(c) Field current

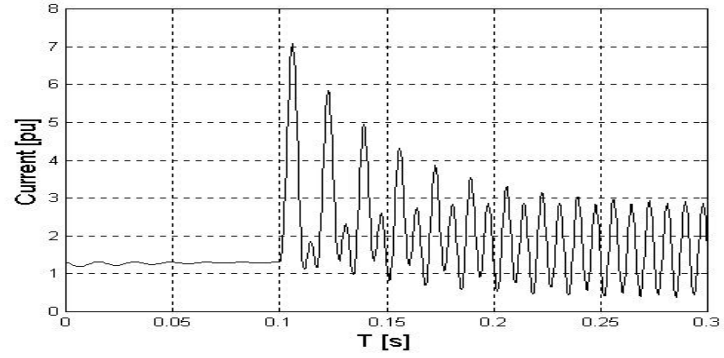
Fig. 4.3 Two-Phase Earth of Power Station A.C. Generator



(a) Phase Current



(b) Torque



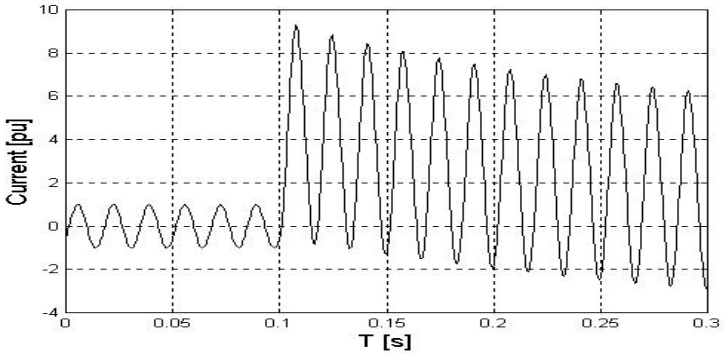
(c) Field Current

Fig. 4.4 Two-Phase Earth of Marine A.C. Generator

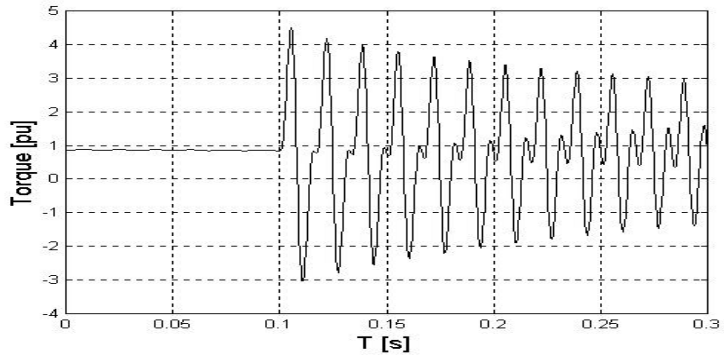
4.3 1상 접지(One-Phase Earth)

무한모선에 연결되어 정격전력을 공급하던 중 한 상이 접지되는 사고가 발생되었다고 가정하자. 접지되지 않은 두 상의 권선에는 정격전압이 가해지지만 접지된 권선에는 전압이 0으로 떨어진다. 접지사고시는 정격부하 상태였으므로 초기전류는 정격전류가 흐르게 되고 접지된 권선이 a상이라면 전압의 조건은 $v_a = 0$, $v_b = e_{gb}$, $v_c = e_{gc}$ 가 된다. 이 초기조건으로 발전기 1상 접지사고시의 과도상태를 모의실험 하였다. Fig. 4.5는 대형발전기 1상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타낸다. 상전류는 9.3(pu), 토크는 4.5(pu)까지 상승하였으며 여자전류는 정상상태에 비하여 2.3배 정도의 최고치를 보였다. Fig. 4.6은 소형디젤발전기 1상 접지시의 상전류, 토크 및 여자전류를 나타내며 상전류는 11.1(pu), 토크는 4.2(pu), 여자전류는 정상상태시에 비해서 4.6(pu) 정도가 된다.

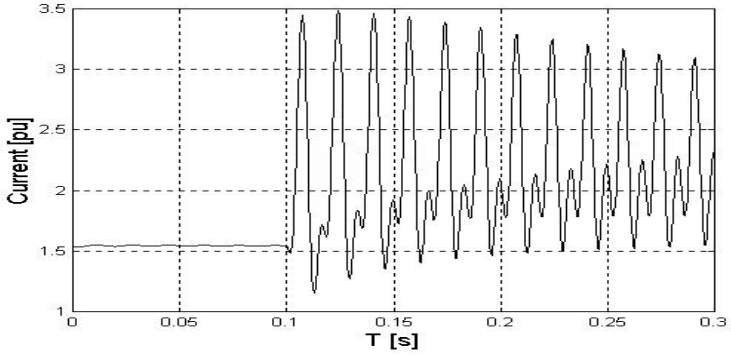
대형, 소형발전기 1상 접지시의 상태를 각각의 3상, 2상 접지시와 비교할 때 상전류는 가장 크게 발생하나 토크는 가장 작게 발생한다.



(a) Phase Current

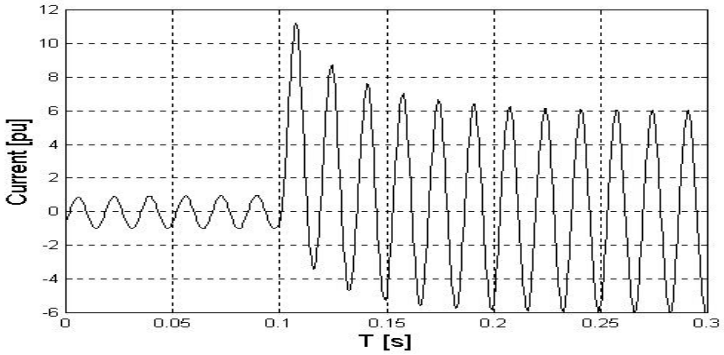


(b) Torque

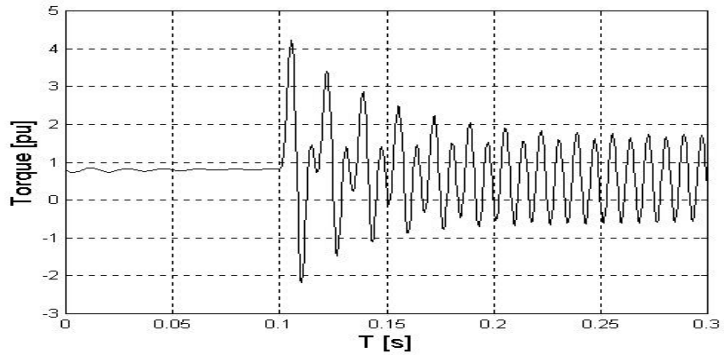


(c) Field Current

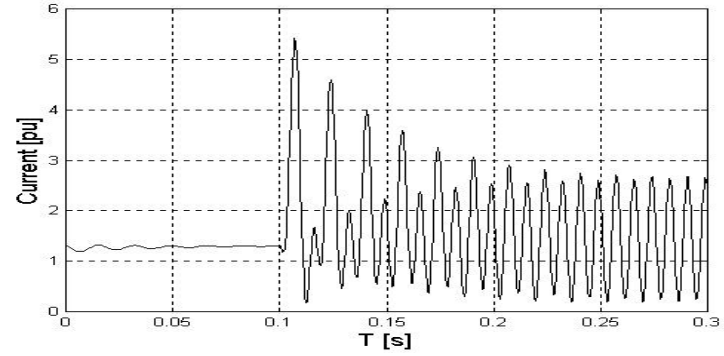
Fig. 4.5 One-Phase Earth of Power Station A.C. Generator



(a) Phase Current



(b) Torque



(c) Field Current

Fig. 4.6 One-Phase Earth of Marine A.C. Generator

4.4 무부하 운전중 병렬투입시의 과도현상

모든 조건이 일치하는 두 대의 발전기(마스터, 슬레이브)를 사용하는 육상, 선박용 전력시스템에서 발전기를 무부하로 병렬운전할시에 전압의 위상각 차이의 정도에 따라 발생하는 과도현상을 모의실험하였다. 모의실험에서는 부하의 영향이 없는 두 발전기 사이의 전기적인 과도현상만을 고려하였다.

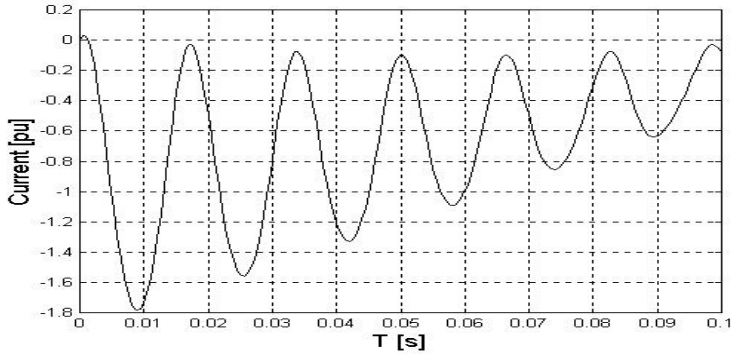
Fig. 4.7은 대형발전기 30° 위상차 병렬시의 상전류, 토크를 나타내고 있으며 상전류는 1.8(pu) 정도의 최고치가 흐른다. 발생토크는 마스터와 슬레이브의 경우 모두 1.8(pu) 정도가 된다. Fig. 4.8은 소형발전기의 경우로 전류는 1.27(pu) 정도가 흐르며 마스터의 경우 1.25(pu), 슬레이브의 경우 1.15(pu) 정도의 토크가 발생한다. 30° 위상차 병렬에서도 대형, 소형발전기 모두 정격을 초과하는 전류 및 토크가 발생함을 알 수 있다.

Fig. 4.9는 대형발전기 60° 위상차 병렬시의 상전류, 토크를 나타내고 있다. 상전류는 3.4(pu)가 발생하며 발생토크는 마스터가 3.5(pu)이고 슬레이브가 3.4(pu)이다. Fig. 4.10은 소형발전기의 경우이며 상전류는 2.6(pu)가 발생하며 토크는 마스터가 2.7(pu), 슬레이브는 2.25(pu)가 발생된다.

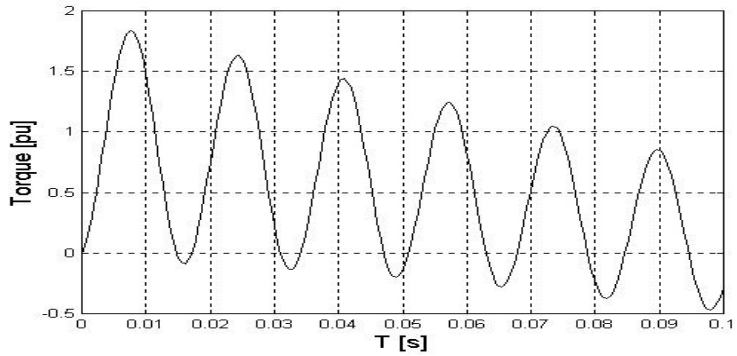
Fig. 4.11은 대형발전기 120° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내고 있다. 발생전류는 6.6(pu)가 되며 토크는 마스터가 5.5(pu), 슬레이브는 5.1(pu)가 발생된다. Fig. 4.12는 소형발전기의 경우이며 전류는 5.2(pu)가 흐르게 되며 마스터는 5.9(pu), 슬레이브는 5(pu)의 토크가 발생한다. 120° 위상차 병렬은 이론적으로 발전기의 선간단락시와 같은 상태이며 대형발전기의 경우에는 선간단락시와 비슷한 토크가 발생되지만 소형발전기에서는 선간단락시보다 더 큰 토크가 발생된다.

Fig. 4.13은 대형발전기 180° 위상차 병렬시의 전류, 토크를 나타내며 Fig. 4.14는 소형의 경우를 나타낸다. 전류는 대형의 경우 7.4(pu), 소형의 경우는 6.8(pu)가 발생하며 마스터, 슬레이브의 발생토크는 4(pu) 정도로 대형의 경우와 소형의 경우 같게 발생한다.

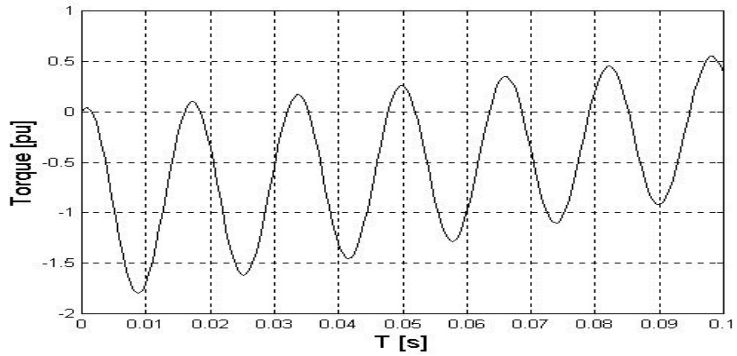
모의실험 결과 위상차 120° 에서 최대의 토크가 발생하고 위상차 180° 에서 최대의 전류가 발생한다.



(a) Phase Current

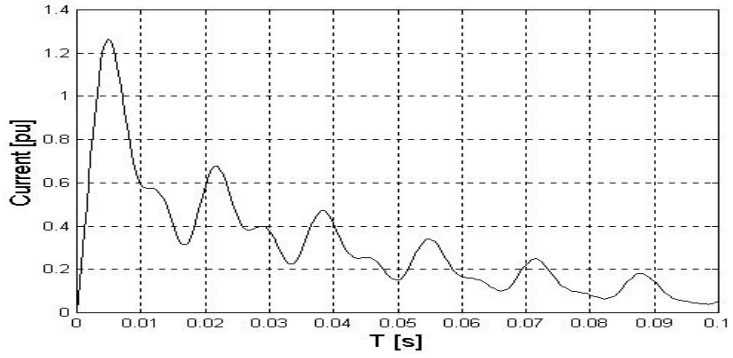


(b) Master Generator Torque

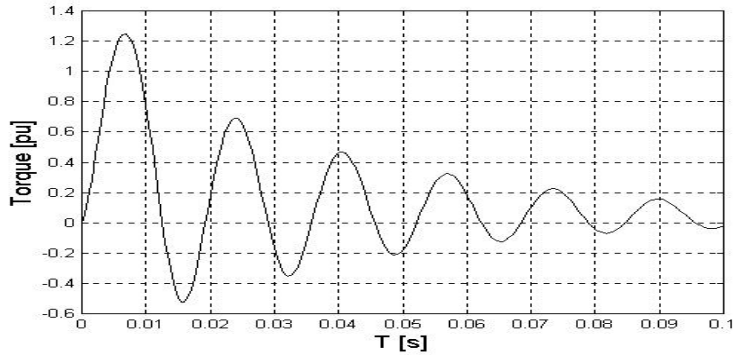


(c) Slave Generator Torque

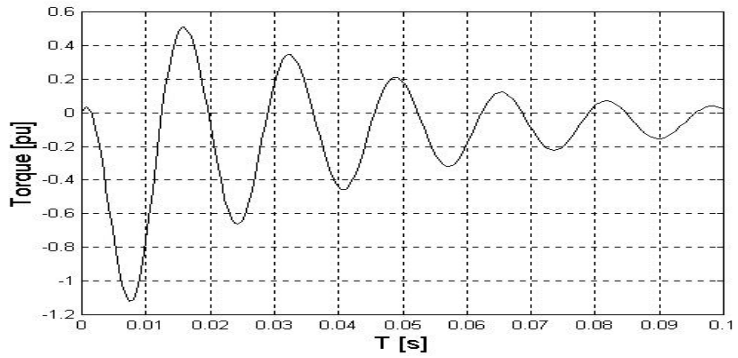
Fig. 4.7 Parallel-on 30 ° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

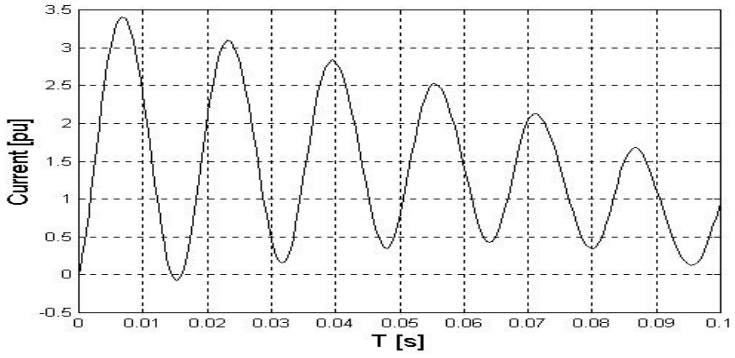


(b) Master Generator Torque

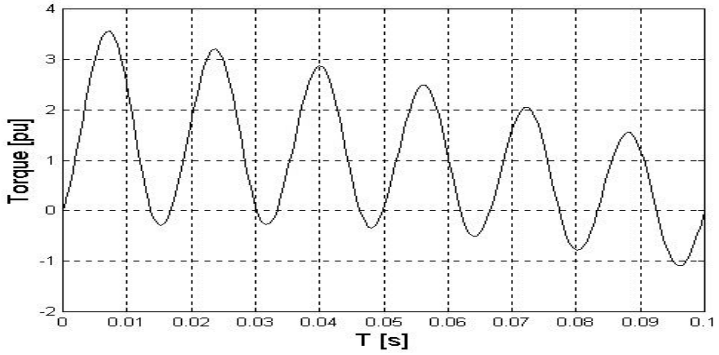


(c) Slave Generator Torque

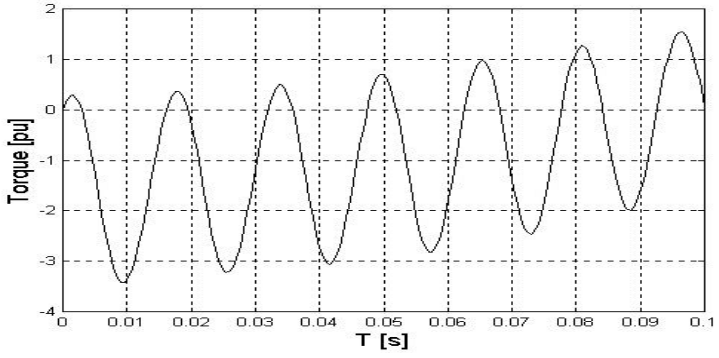
Fig. 4.8 Parallel-on 30° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

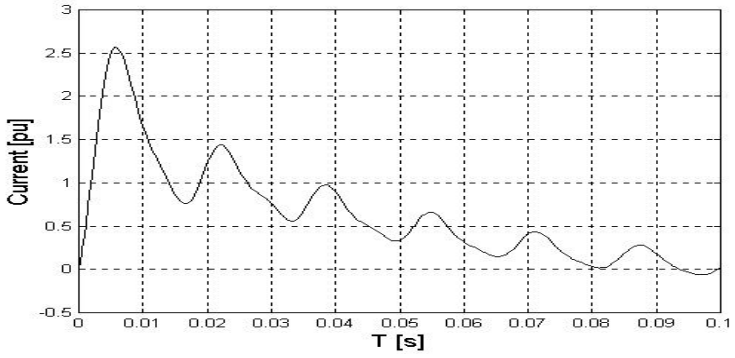


(b) Master Generator Torque

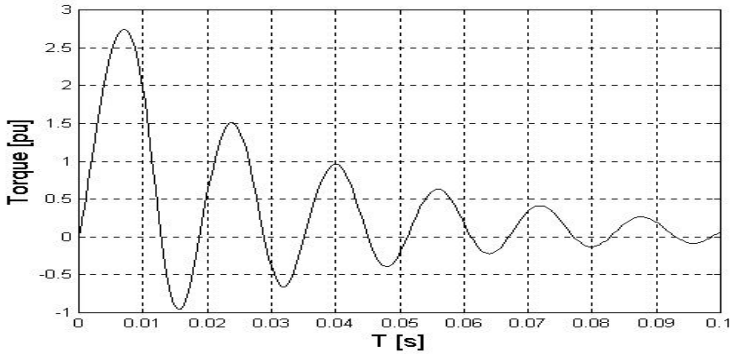


(c) Slave Generator Torque

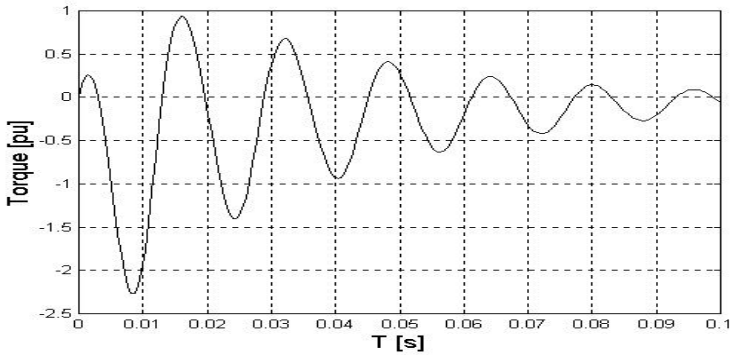
Fig. 4.9 Parallel-on 60° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

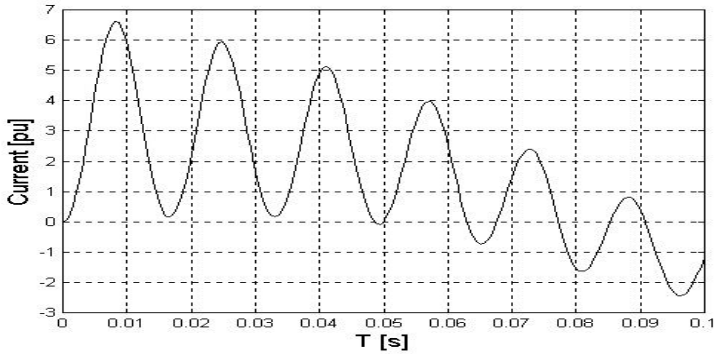


(b) Master Generator Torque

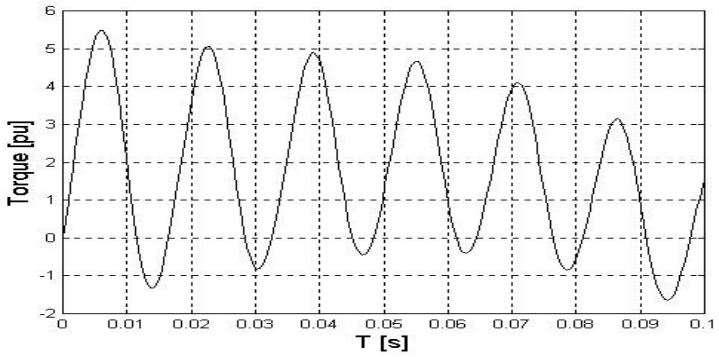


(c) Slave Generator Torque

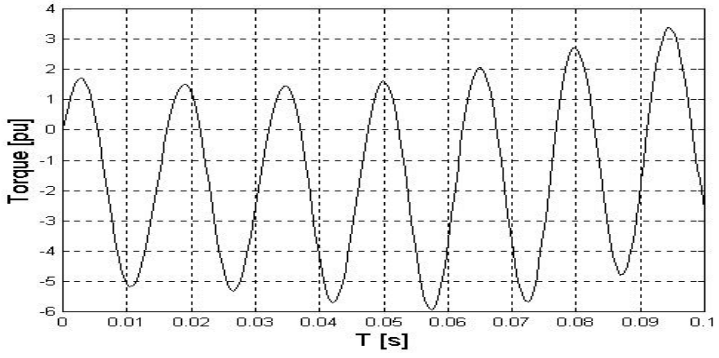
Fig. 4.10 Parallel-on 60° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

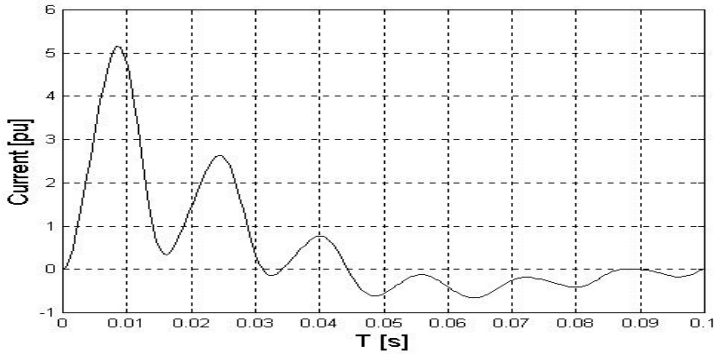


(b) Master Generator Torque

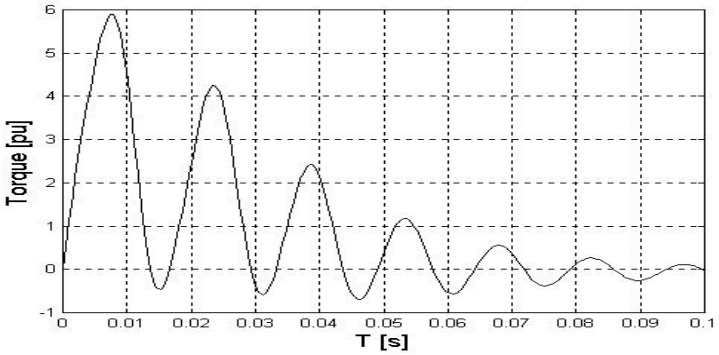


(c) Slave Generator Torque

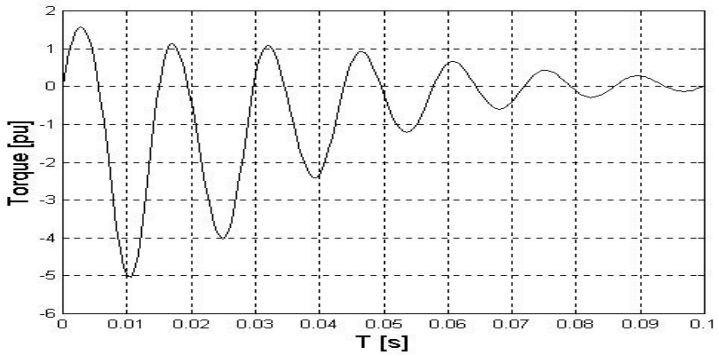
Fig. 4.11 Parallel-on 120° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

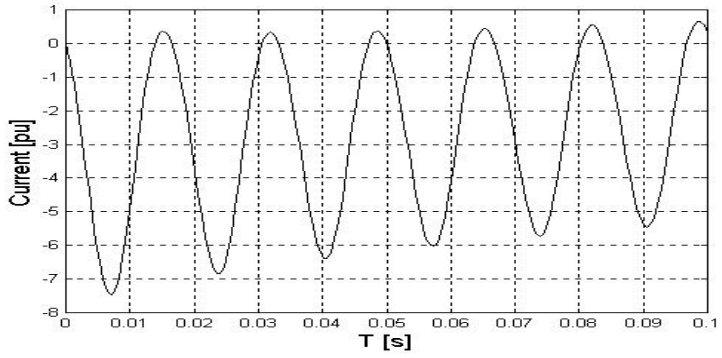


(b) Master Generator Torque

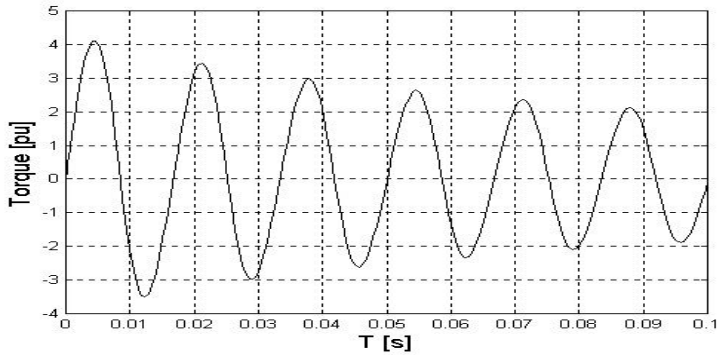


(c) Slave Generator Torque

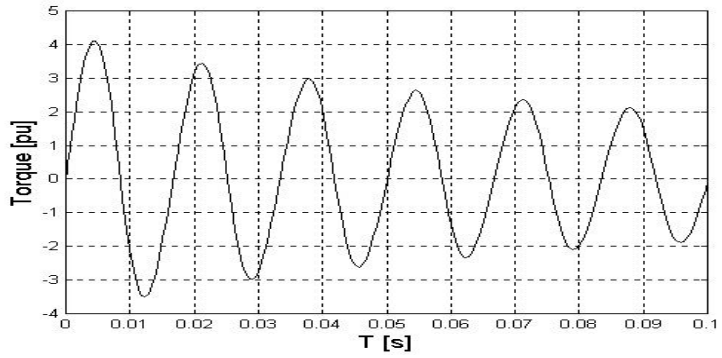
Fig. 4.12 Parallel-on 120° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

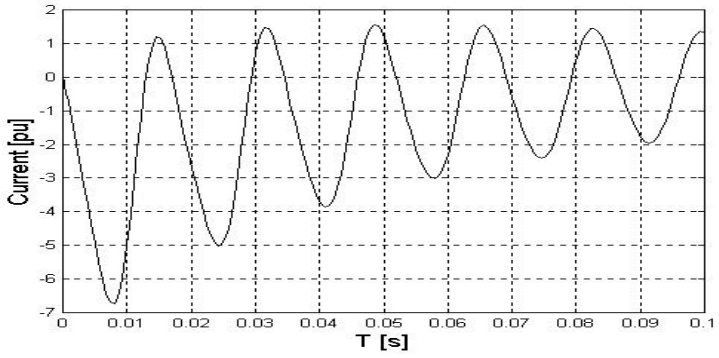


(b) Master Generator Torque

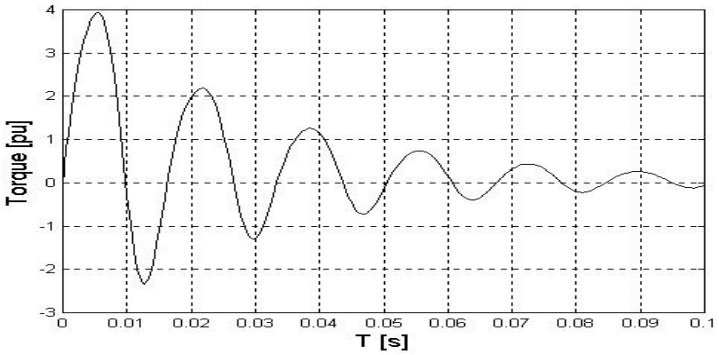


(c) Slave Generator Torque

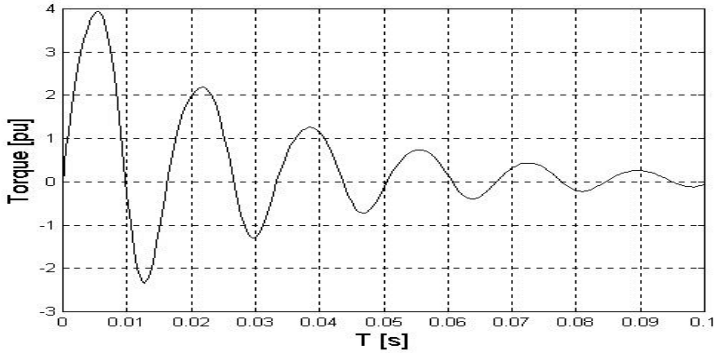
Fig. 4.13 Parallel-on 180° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque



(c) Slave Generator Torque

Fig. 4.14 Parallel-on 180° difference of Marine Generators

4.5 부하 운전중 병렬투입시의 과도현상

4.5.1 정격 운전중인 1대의 발전기에 병렬투입의 경우

두 대의 발전기를 사용하는 육상, 선박용 전력시스템에서 전부하로 운전중인 마스터에 슬레이브를 병렬투입시 두 발전기 사이의 전압 위상각의 차이 정도에 따라 발생하는 과도현상을 모의실험하였다.

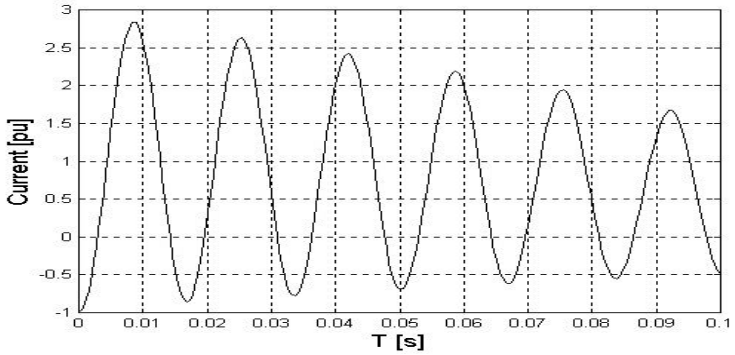
Fig. 4.15는 대형발전기 30° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내며 발생전류는 2.8(pu), 발생토크는 마스터가 2.9(pu), 슬레이브는 1.9(pu)가 발생한다. Fig. 4.16은 소형의 경우로 전류는 2.2(pu), 토크는 마스터가 2.5(pu), 슬레이브는 1.3(pu)가 발생한다. 30° 위상차 병렬에서도 대형, 소형발전기 모두 정격을 초과하는 전류와 토크가 발생하며 무부하시의 경우보다도 발생하는 전류 및 토크가 크다.

Fig. 4.17은 대형발전기 60° 위상차 병렬시의 전류 및 토크를 나타내며 발생전류는 4.6(pu), 발생토크는 마스터가 4.7(pu) 슬레이브는 3.5(pu)가 발생된다. Fig. 4.18은 소형의 경우로 전류는 3.5(pu)가 발생하며 토크는 마스터의 경우 4.5(pu), 슬레이브의 경우 2.8(pu)가 발생한다.

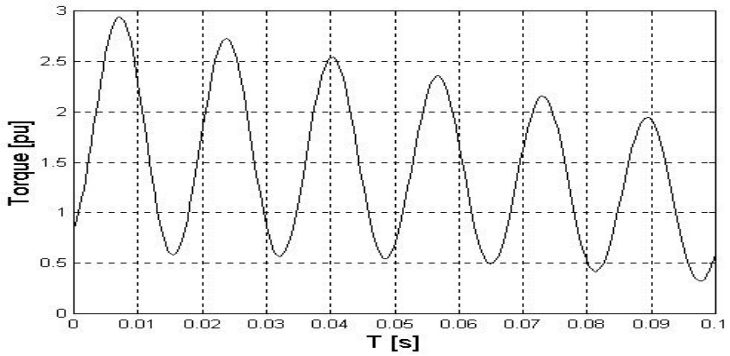
Fig. 4.19는 대형발전기 120° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내며 전류는 7.2(pu)가 발생되고 토크는 마스터가 6(pu), 슬레이브는 5.5(pu)가 발생한다. Fig. 4.20은 소형의 경우이며 전류는 6.4(pu)가 발생하고 토크는 마스터가 6(pu), 슬레이브는 4.6(pu) 정도가 발생된다. 120° 위상차 병렬시의 발생토크가 가장 크며 무부하시의 경우보다도 발생하는 전류 및 토크가 크다.

Fig. 4.21은 대형발전기 180° 위상차 병렬시의 발생전류와 토크를 나타낸다. 전류는 8(pu) 정도 발생하며 발생토크는 마스터가 4.3(pu), 슬레이브는 7(pu)로 오히려 슬레이브에 더 크게 발생된다. Fig. 4.22는 소형의 경우로 전류는 6.8(pu)가 발생하며 토크는 마스터가 4.6(pu), 슬레이브는 7.4(pu)로 대형의 경우와 같이 슬레이브가 더 크게 발생한다.

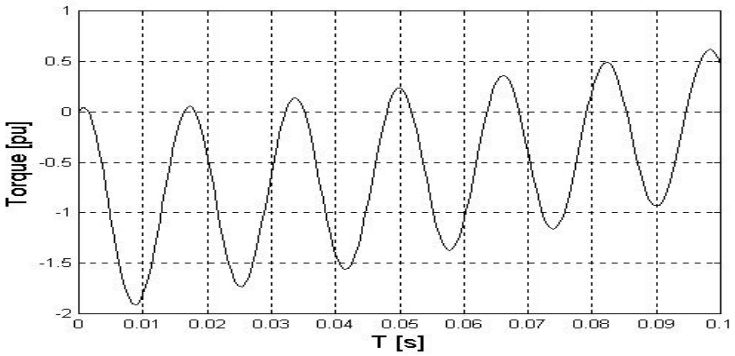
모의실험 결과 두 대의 발전기를 사용하는 전력시스템에서 발전기 병렬시 발생하는 토크는 위상차가 180° 인 경우를 제외하면 슬레이브보다 마스터가 더 크게 발생한다. 그리고 발생 전류는 위상차가 180° 일 때 가장 크게 발생한다.



(a) Phase Current

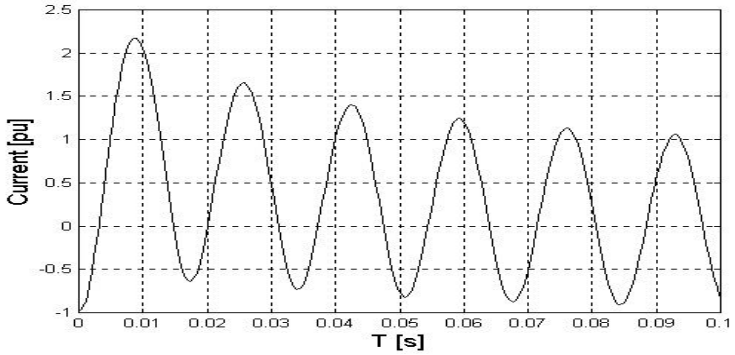


(b) Master Generator Torque

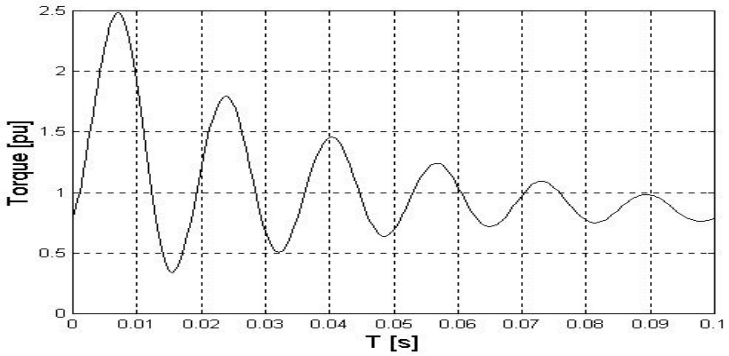


(c) Slave Generator Torque

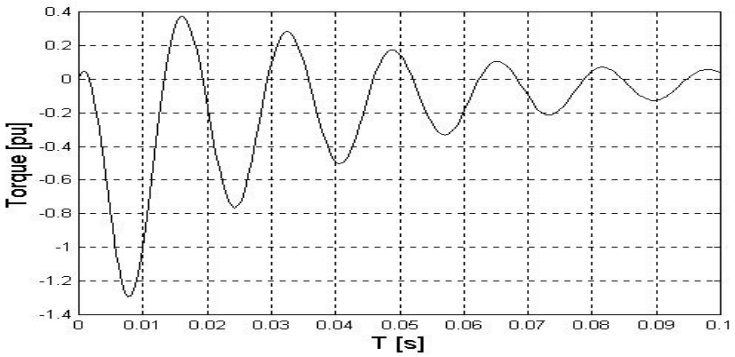
Fig. 4.15 Parallel-on 30° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

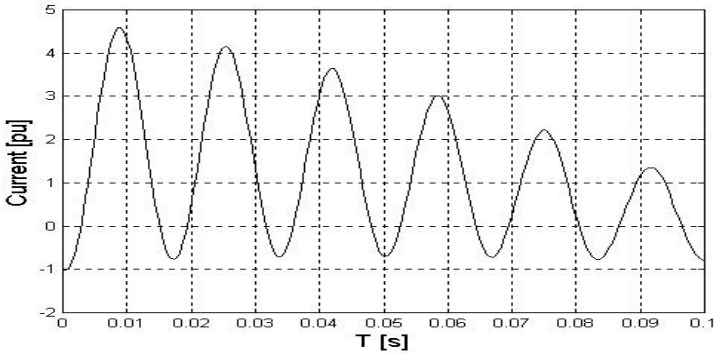


(b) Master Generator Torque

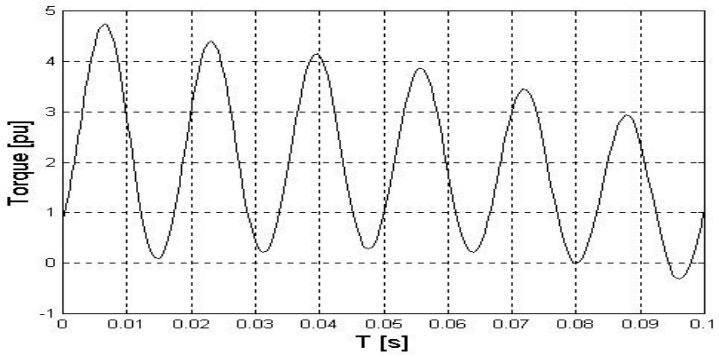


(c) Slave Generator Torque

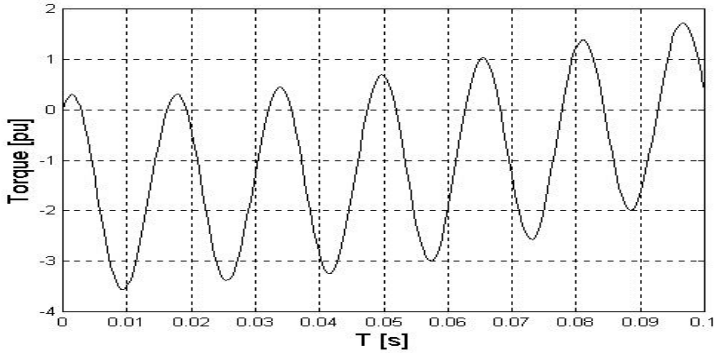
Fig. 4.16 Parallel-on 30° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

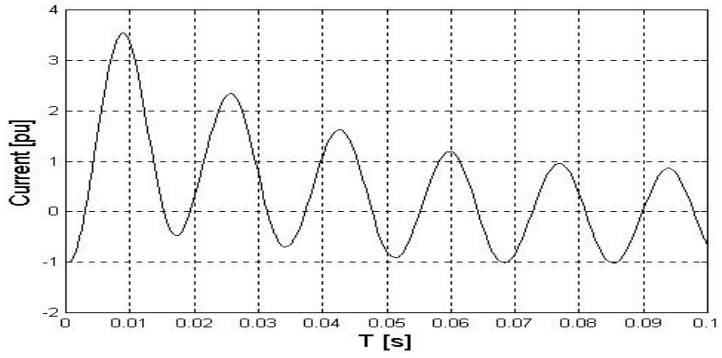


(b) Master Generator Torque

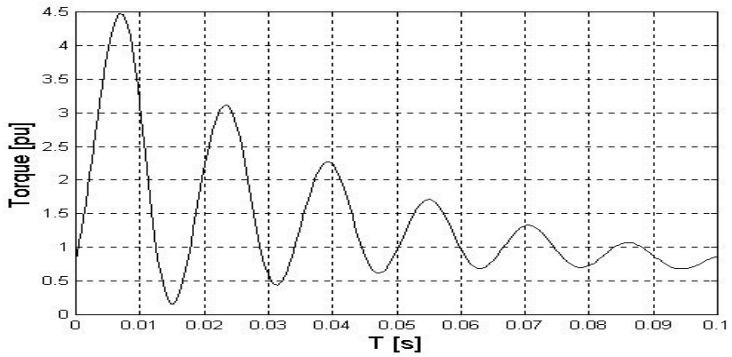


(c) Slave Generator Torque

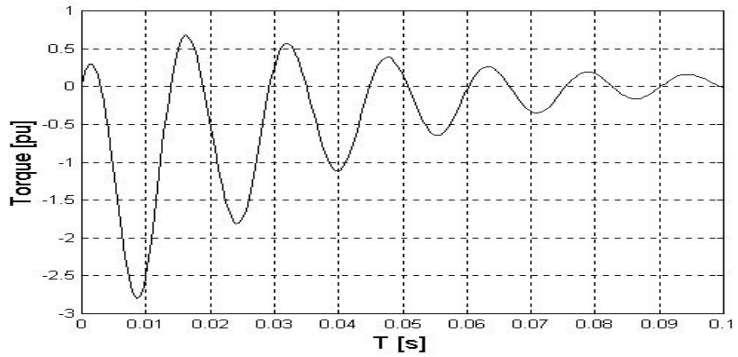
Fig. 4.17 Parallel-on 60° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

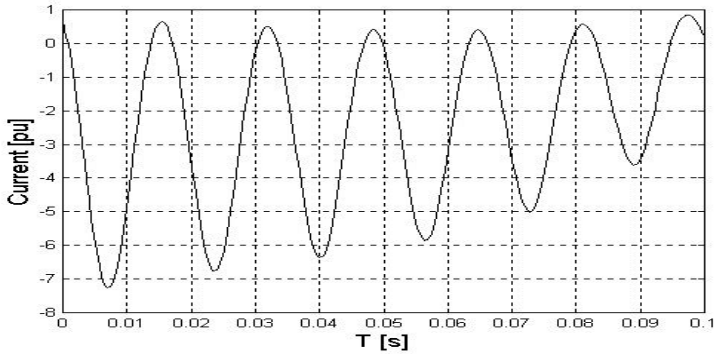


(b) Master Generator Torque

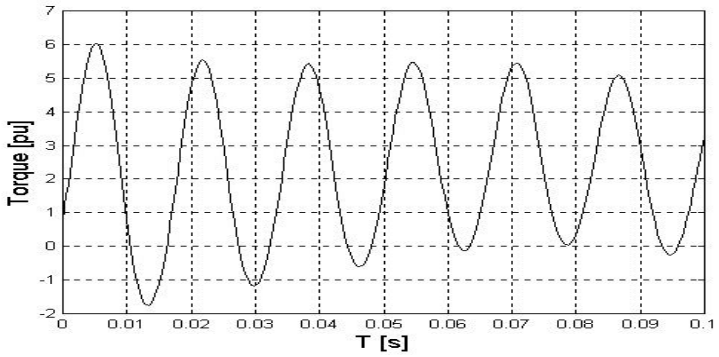


(c) Slave Generator Torque

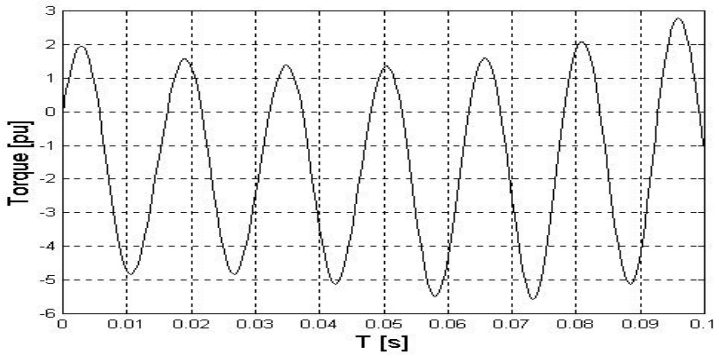
Fig. 4.18 Parallel-on 60° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

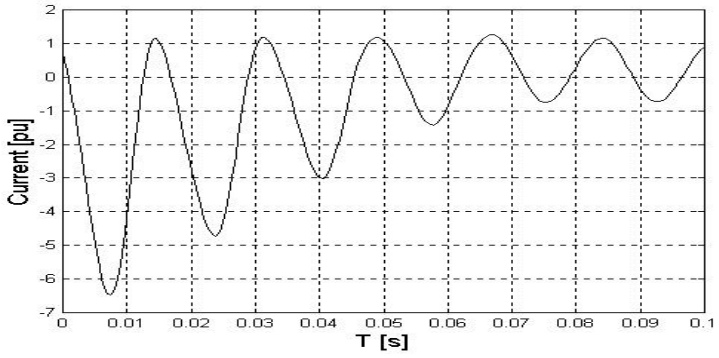


(b) Master Generator Torque

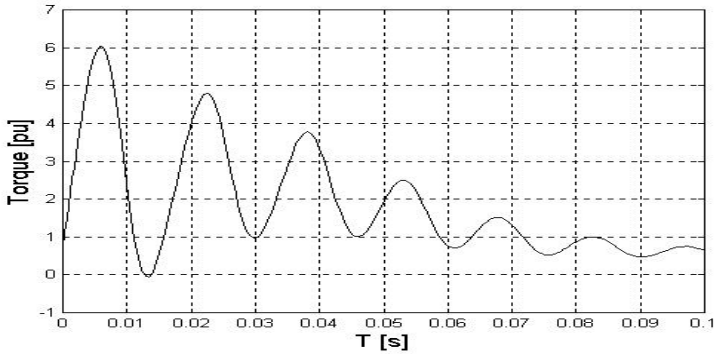


(c) Slave Generator Torque

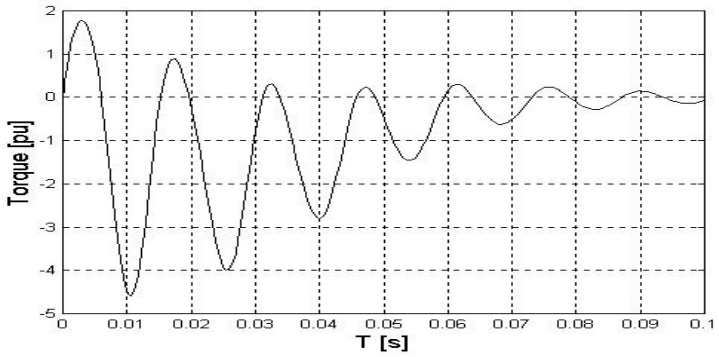
Fig. 4.19 Parallel-on 120° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

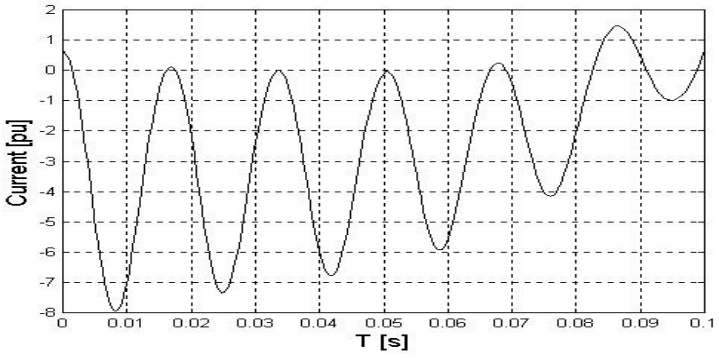


(b) Master Generator Torque

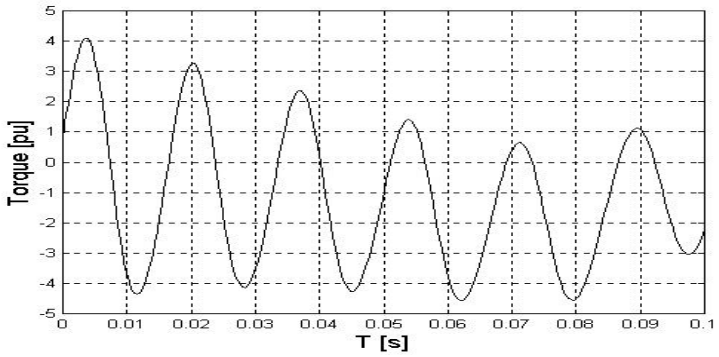


(c) Slave Generator Torque

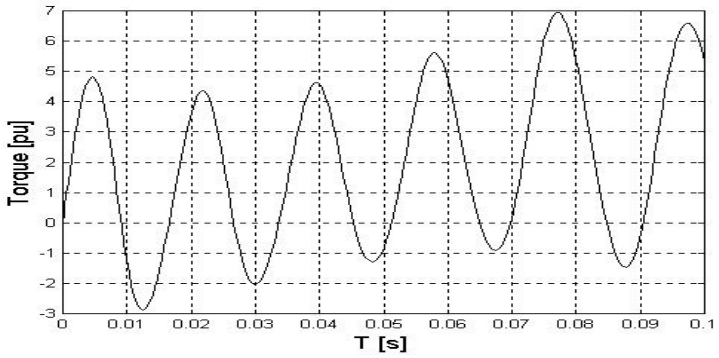
Fig. 4.20 Parallel-on 120° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

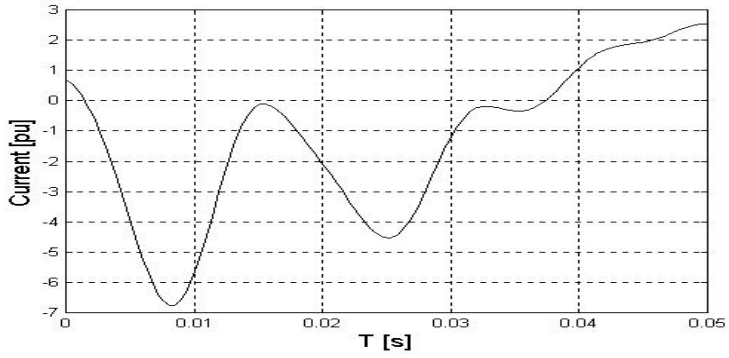


(b) Master Generator Torque

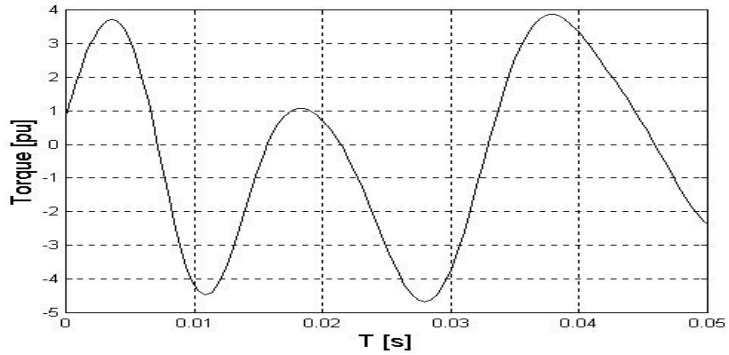


(c) Slave Generator Torque

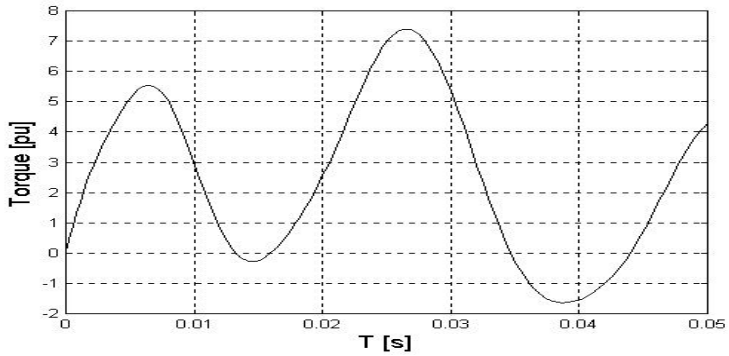
Fig. 4.21 Parallel-on 180 ° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque



(c) Slave Generator Torque

Fig. 4.22 Parallel-on 180° difference of Marine Generators

4.5.2 정격 운전중인 2대 이상의 발전기에 병렬투입의 경우

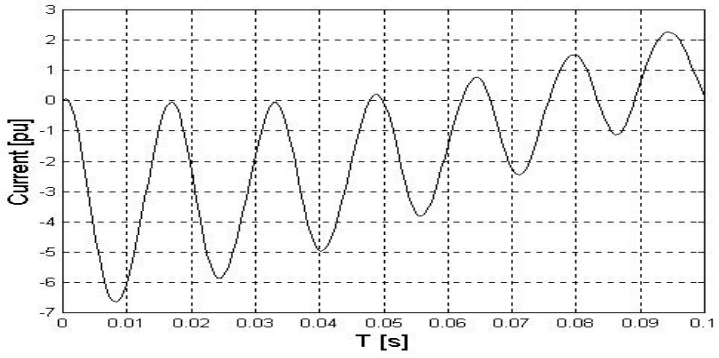
여러 대의 발전기를 사용하는 전력시스템에서의 발전기 병렬운전 모의실험을 행하였다. 육상용 전력시스템에서는 대형발전기(마스터) 10대가 병렬로 정격운전중 한 대의 슬레이브가 전력시스템으로 투입되는 상태를 모의실험했으며 선박용 전력시스템에서는 소형발전기(마스터) 2대가 병렬로 정격운전중 한 대의 슬레이브가 시스템에 투입되는 상태를 모의실험하였다.

여러 대의 발전기를 병렬운전하여 사용하는 전력시스템의 등가저항 및 리액턴스는 한 대의 발전기를 사용하는 전력시스템보다 작아지게 된다. 만약 동일한 발전기 n 대를 병렬운전하여 사용한다면 이 시스템의 등가저항 및 리액턴스는 한 대의 발전기를 사용하는 시스템에 비하여 $\frac{1}{n}$ 배로 작아지게 된다.

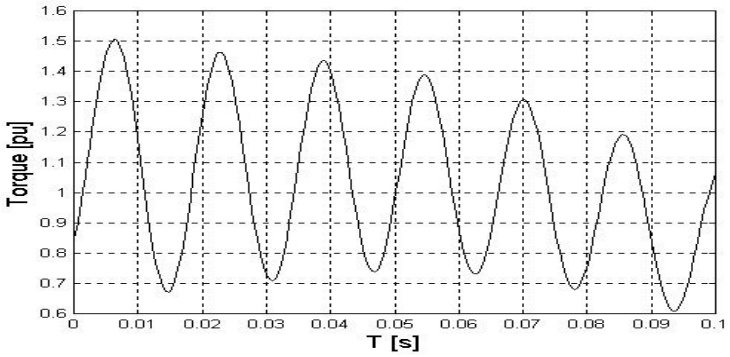
Fig. 4.23은 대형발전기 60° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내고 있다. 슬레이브의 발생전류는 6.6(pu)이고 발생토크는 마스터가 1.5(pu), 슬레이브는 6.2(pu)로 슬레이브에 높은 토크가 발생한다. Fig. 4.24는 소형발전기의 경우로 전류는 슬레이브의 경우 3.8(pu)이고 토크는 마스터가 3.1(pu), 슬레이브는 3.6(pu)로 슬레이브에 발생하는 토크가 더 크다. 전력시스템에 병렬운전되는 발전기가 많으면 많을수록 슬레이브에 발생하는 전류 및 토크는 커진다.

Fig. 4.25는 대형발전기 120° 위상차 병렬시의 전류와 토크를 나타내며 슬레이브의 발생전류는 12(pu)이고 발생토크는 마스터가 1.7(pu), 슬레이브가 11.6(pu) 정도 발생한다. Fig. 4.26는 소형발전기의 경우로 슬레이브의 발생전류는 8(pu)가 발생하며 토크는 마스터가 3.9(pu), 슬레이브는 5.9(pu)가 발생한다. 대형발전기는 정격운전중인 1대의 발전기에 병렬투입시보다 훨씬 큰 전류와 토크가 발생되는데 이는 1대의 발전기를 사용하는 전력시스템보다 등가저항 및 리액턴스가 $\frac{1}{10}$ 로 줄어들었기 때문이다.

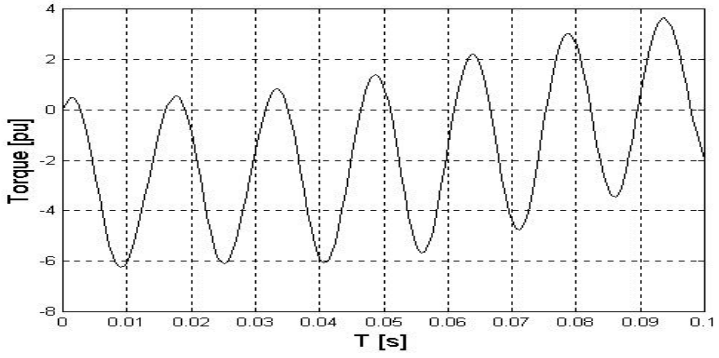
모의실험 결과 두 대의 동기발전기를 사용하는 시스템과 달리 투입되는 슬레이브에 더 큰 전류와 토크가 발생하며 그 크기는 병렬운전되는 발전기가 많으면 많을수록 커진다.



(a) Phase Current

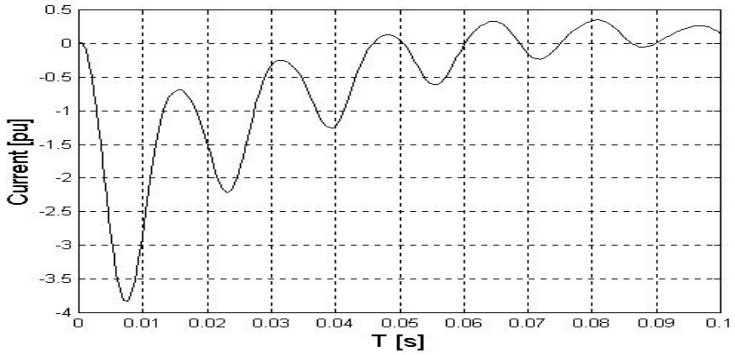


(b) Master Generator Torque

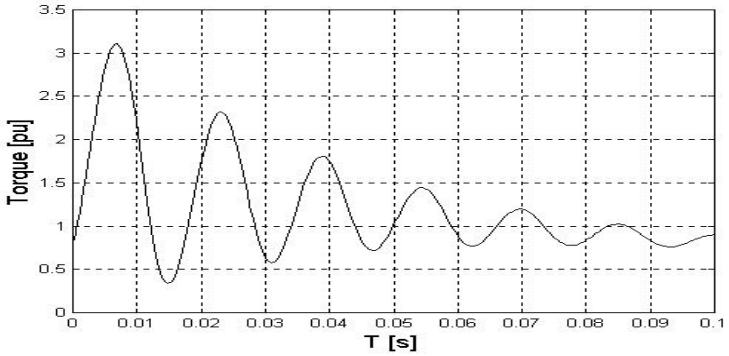


(c) Slave Generator Torque

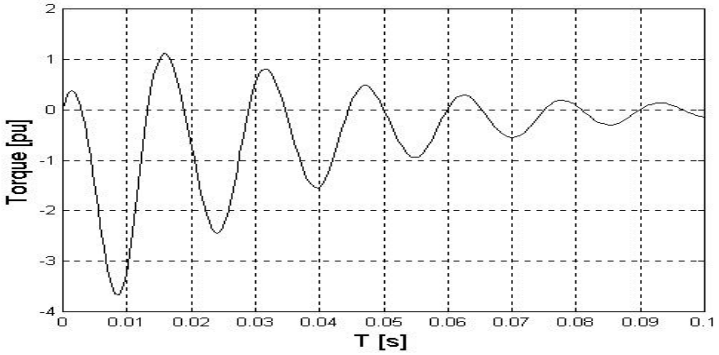
Fig. 4.23 Parallel-on 60° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current

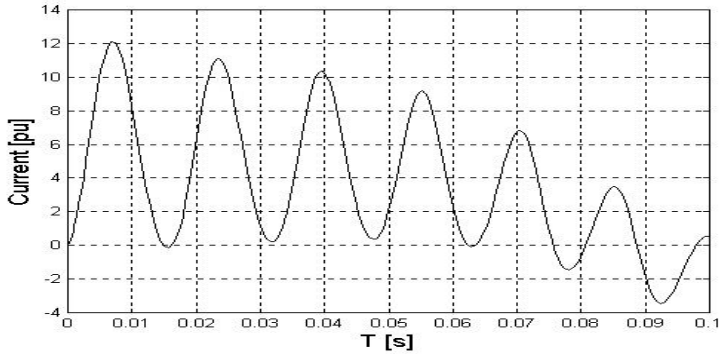


(b) Master Generator Torque

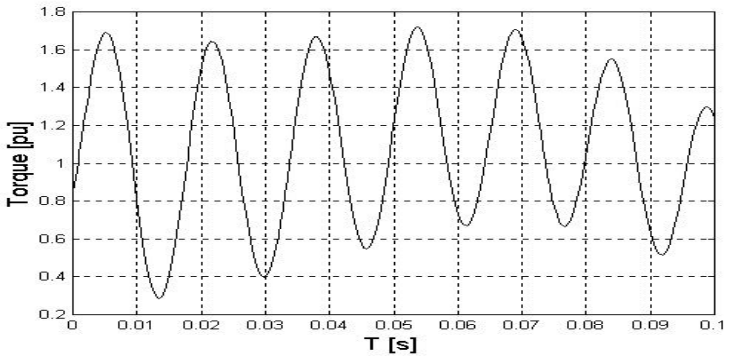


(c) Slave Generator Torque

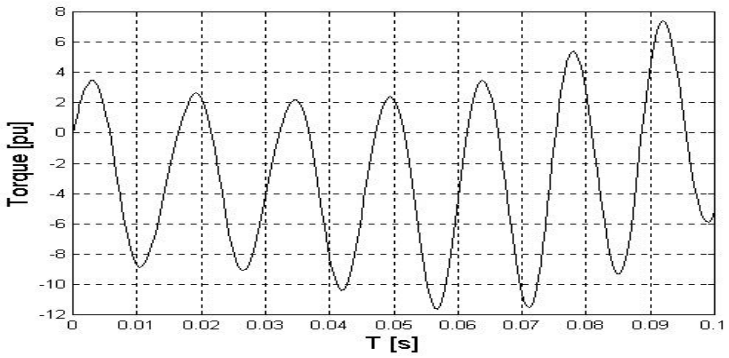
Fig. 4.24 Parallel-on 60° difference of Marine Generators



(a) Phase Current

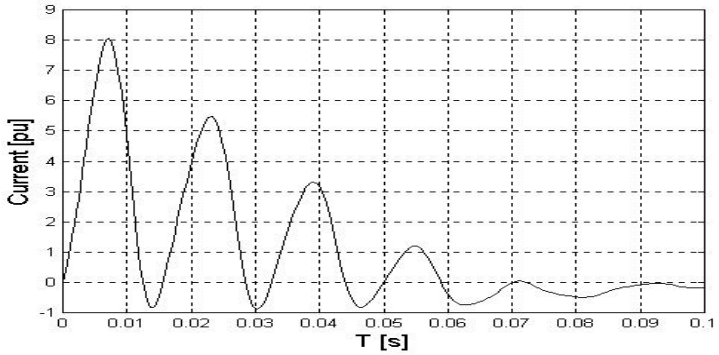


(b) Master Generator Torque

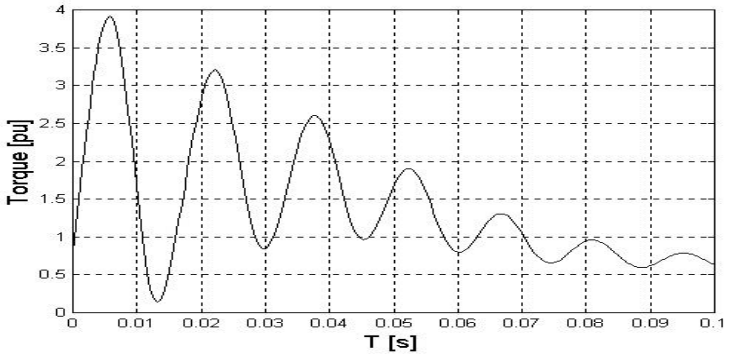


(c) Slave Generator Torque

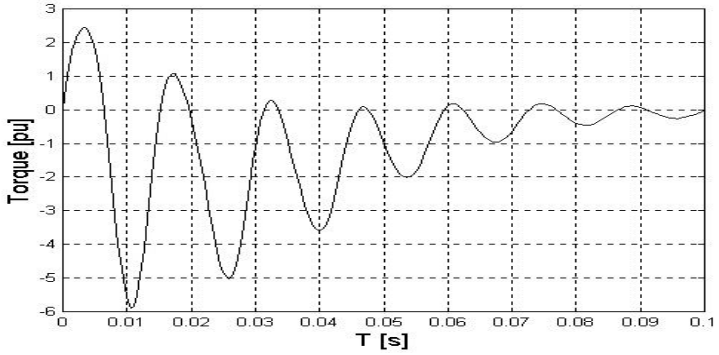
Fig. 4.25 Parallel-on 120° difference of Power Station Generators



(a) Phase Current



(b) Master Generator Torque



(c) Slave Generator Torque

Fig. 4.26 Parallel-on 120° difference of Marine Generators

제 5 장 결 론

본 논문에서는 교류발전기와 교류발전기 병렬운전시의 수학적 모델을 제시하고 모델로부터 교류발전기 및 교류발전기 병렬운전시의 전압방정식을 유도하였으며 이 전압방정식을 이용하여 전기적인 단락 및 접지시의 과도현상과 병렬운전시 전압의 위상각 차이에서 기인하는 과도현상을 서로 비교할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 그리고 모의실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 교류발전기 병렬운전시에 발생하는 과도토크 및 과도전류는 병렬운전시의 전압의 위상각 차이 및 마스터의 부하 정도에 따라 다르게 발생하나 전압의 위상각 차이가 120° 일 때 최대의 과도전류와 과도토크가 발생하며 그 크기는 발전기 병렬운전시의 상태에 따라서 전기적인 단락, 접지시의 과도상태보다 더 큰 전류와 토크를 발생시킬 수 있다.

2) 전력시스템에 2대의 발전기를 사용하는 경우의 병렬에서는 마스터에 더 큰 전류와 토크가 발생하나 전력시스템에 여러 대의 발전기가 병렬로 운전중인 경우의 병렬에서는 시스템에 투입되는 슬레이브에 더 큰 전류와 토크가 발생된다.

3) 육상발전소와 비교할 때 선박에서는 발전기 병렬운전시에 부하가 큰 모터의 갑작스런 기동 등으로 전압의 위상각의 차이가 날 수 있고 또한 운전자의 잘못된 동기투입으로 전압의 위상각 차이가 난 채 병렬운전할 수 있어 발전기에 순간적으로 과도한 토크를 발생시킬 수 있다. 발전기에서 전기적인 단락사고는 흔하게 일어나지 않지만 부적절한 동기화는 빈번히 이루어지고 있는 실정이므로 발전기 설계시 동기화실패에 기인하는 과도토크를 감안하여 설계하는 것이 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

[1] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1987

[2] de Jong, W. and Robinson. J.K, "Generator Failures caused by Synchronising Torque", Transactions of Institute of Marine Engineers, Vol. 99. Paper 8. 1986

[3] **현대중공업 전동기설계부**, "**고려해운**/SAS-375**호선** No.2 **발전기** SHAFT **절손사고 보고서**", **현대중공업 전동기설계부**, 1999

[4] R. H. Park, "Two - Reaction Theory of Synchronous Machines - Generalized Method of Analysis - part Ⅰ", AIEE Trans., Vol. 48, July 1929, pp. 716-727.

[5] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999

[6] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, 1998

[7] Peter F. Ryff, "ELECTRIC MACHINERY", Prentice Hall, 1994

[8] Vincent Del Toro, "Electric Power Systems", Prentice Hall, 1992

[9] Bhag S. Guru Huseyin R. Hisiroulu, "Electric Machinery and Transformers", Harcourt Brace & Company, 1995

[10] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "ELECTRIC MACHINERY", McGraw-Hill, 1991

[11] George Mcpherson, Robert D. Laramore, "AN INTRODUCTION TO ELECTRICAL MACHINES AND TRANSFORMERS", John Wiley & Sons, 1981

[12] Paresh C. Sen저 장도현, 차귀수, 신대철, 홍선기 공역, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, 1997

[13] Shousuke Noguchi 저, 박한종역, "전기기기 마스터북", 성안당, 1996

[14] Katshhiko Ogata저 황우현, 김경숙 역, "MATLAB 제어공학", 멀티정보사, 1997

[15] 정 슬, "제어시스템의 분석과 MATLAB의 활용", 청문각, 1999

[16] 한국전력공사, "발전기초 III", 한국전력공사

감사의 글

먼저 이 작은 결실을 지금까지도 저의 든든한 후원자이시며 사랑이 많으신 아버님과 늘 저를 위하여 기도하시던 지금은 고인이 되신 어머님께 바칩니다. 그리고 친자식처럼 저를 아껴주시고 단지 지식의 전달뿐만이 아니라 모든 방면에서 도움을 주신 김 성환 지도교수님께 깊은 감사를 드리며 또한 이 경숙 사모님께도 감사의 마음을 전하여 드립니다.

항상 조교들에게 관심과 격려를 아끼지 아니하시는 김 정렬 승선생활관장님과 생활지도 교수님, 그리고 승선생활관 지도관실의 동료 생활교육 지도관님들과 조 주희씨에게도 감사드립니다.

논문의 심사를 맡아주신 정 병건, 김 종호 교수님께도 감사드리며 연구실의 김 종수 선배님, 그리고 궂은일을 도맡아 해준 김 덕기 후배님에게도 감사의 뜻을 전합니다.

돌이켜보면 2년이란 세월은 짧게만 느껴지며 학문 연구의 길은 너무나 멀고 험난한 것 같습니다. 배우면 배울수록 제 자신의 부족함과 미약함을 알게되지만 한편으로 모르던 분야를 조금이나마 알게되니 저의 좁던 시야가 약간은 넓어지는 것 같습니다. 작은 성과를 맺은 이때 앞으로도 더욱더 열심히 생활하며 단지 지식에만 치우치지 아니하고 몸과 마음도 건강한 사회의 일원이 될 것을 다짐해 봅니다.

마지막으로 가정을 아름답게 꾸밀 줄 알고 늘 곁에서 사랑과 내조를 아끼지 않는 아내에게도 깊이 감사하며 이 글을 마칩니다.